



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências da Terra

HIDROGEOLOGIA DOS DOMÍNIOS ENVOLVENTES DAS TERMAS DA TOUCA, ALPEDRINHA, FUNDÃO

Válter André Goes da Silva

Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas

Orientadores científicos

Prof. Doutor José Manuel Martins de Azevedo, DCT-FCT, Universidade de Coimbra.

Prof. Doutora Ana Maria Aguiar Castilho Ramos Lopes, DCT-FCT, Universidade de Coimbra.

Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Gostaria de referir o meu agradecimento e reconhecimento a várias pessoas pela contribuição e apoio ao longo dos anos e na realização desta tese, nomeadamente:

Ao Professor Doutor José Manuel Martins de Azevedo, por toda a disponibilidade e apoio que me deu ao longo da licenciatura e da tese.

À Professora Doutora Ana Maria Aguiar Castilho Ramos Lopes, por toda a ajuda que me proporcionou assim como os conhecimentos que me transmitiu ao longo desta tese.

À Câmara Municipal do Fundão, por toda a documentação que me foi passada que foi essencial para a tese.

Ao Sr. Presidente da Junta de Freguesia de Alpedrinha, Carlos Alberto Martins Ventura, pela disponibilidade que demonstrou ao longo da tese.

À Cláudia, minha namorada, um MUITO OBRIGADO, por ser fundamental ao longo destes anos, pelo seu amor, carinho e apoio incondicional assim como por tudo o que significa para mim.

Ao meu avô Agostinho que foi fundamental para que me tornasse hoje na pessoa que sou.

Aos meus pais, Maria da Conceição e José Nelson, ao meu irmão Williams, à minha avó Albertina, tio Chico e tia Maria que sempre me apoiaram.

À Dona Manuela, por todo o carinho e apoio que me deu.

Aos meus amigos e colegas, Fábio Antunes, Bruno Teixeira, Fábio Rocha, Ricardo Pinto, Vítor Hugo, Rafael Mendes, Filipe Domingues, André Paiva e Tiago Gertrudes, assim como o pessoal da sala de Halterofilismo (Alex, Bruno Almeida, Ricardo Santos, Ricardo Monteiro e Azul), com os quais passei momentos que se levam para a vida.

A todas as outras pessoas que não referi, mas que também contribuíram direta e indiretamente para a conclusão bem-sucedida destes anos.

RESUMO

Na presente dissertação apresenta-se a caracterização, classificação e modelação conceptual da hidrogeologia dos domínios enquadrantes das Termas da Touca, nomeadamente, da bacia hidrográfica envolvente - micro-bacia da ribeira do Ameal (mb RA). Apresenta-se também a caracterização geológica daquele domínio e os enquadramentos regionais ao nível geológico, tectónico, hidrogeológico e hidroclimatológico.

O domínio estudado enquadra-se na Zona Centro Ibérica e na unidade hidrogeológica do Maciço Antigo.

Hidroclimatologicamente, a região enquadrante do local estudado apresenta uma precipitação média anual que varia entre 800 e 1800 mm/ano, enquanto que, a temperatura média varia entre 10°C e 15°C. Nesta região, os balanços hídricos apontam para uma recarga aquífera muito variável, estimando-se valores médios entre 150 e 300 mm/ano na área da bacia da Touca, podendo ser mais elevados na zona envolvente até cerca de 750 mm/ano.

A geologia da mb RA é monótona e constituída por granitos biotíticos porfiroides de origem tardi-pós-D3, em relação à orogenia Varisca, normalmente bastante alterados e fraturados na camada superficial. Estruturalmente apresentam as seguintes famílias de fraturação: N60-70°E, N40-50°W, N10-20°W e N30-40°E.

Na zona estudada ocorrem dois aquíferos principais: um aquífero freático (não-confinado) de natureza porosa e porosa-fissurada e um aquífero profundo confinado a semi-confinado do tipo fissural.

O aquífero freático evolui em toda a micro-bacia e, morfologicamente acompanha a topografia local. A água do aquífero freático apresenta valores médios de temperatura de 12,5°C, pH variando entre 5,0 e 6,7 e baixa condutividade elétrica (50 a 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$), expressando, assim, grande proximidade à água de recarga aquífera, isto é, água proveniente da precipitação atmosférica.

Nos domínios profundos ocorre um aquífero de natureza fissural, com características minerotermais. A água ascende, no local das Termas da Touca, através de falhas N10-20°W e apresenta um pH próximo de 9,0, temperatura próxima dos 17,5°C e uma condutividade elétrica de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Os resultados das análises químicas da água minerotermal expressam que:

- A água se insere na fácies bicarbonatada sódica; sendo considerada ainda sulfúrea, fluoretada e fracamente mineralizada, com reação alcalina e macia.
- A água está sobressaturada em óxidos, hidróxidos, carbonatos e sulfuretos de ferro, assim como em fluorite, enxofre, talco e quartzo; e os minerais em equilíbrio químico com a água são a aragonite e a calcite.
- Os índices hidrogeoquímicos evidenciam que a água tem características típicas de uma água com circulação em rochas graníticas, de circulação profunda e com um tempo de residência elevado, onde ocorrem trocas iónicas e a alteração da rocha mãe, para a obtenção de silicatos.
- Os geotermómetros (sílica, Na/K, Mg/Li e K/Mg) apontam para valores de temperatura no reservatório da ordem dos 60 a 99°C.

Palavras-chave: Termas da Touca; Granito; Hidrogeologia; Aquífero; Hidrodinâmica; Hidrogeoquímica; Modelação conceptual.

ABSTRACT

The aim of this dissertation is to provide a characterization, classification and conceptualized modelling of ribeira do Ameal's hydrographic micro-basin (mb RA), with surrounds the Termas da Touca termomineral spring. This dissertation also features a geological characterization of that hydrographic domain, as well as, the necessary regional settings in terms of geology, tectonics, hydrogeology and hydroclimatology

The study area (mb RA) is located within the Old Massif hydrogeological unit, and belongs to the Central Iberian Zone.

In this region (mb RA), the average annual precipitation ranges between 800 and 1800 mm/year, while the temperature values vary between 10°C and 15°C. Such numbers indicate a highly variable aquifer recharging (the maximum value for recharge is estimated in 750 mm/year).

The geology of the mb RA is monotonous, mainly consisting of porphyroid biotite granites of tardi-post-D3 phase (Variscan orogeny), usually chemically modified and fractured in the sub-surface layer. Structurally speaking, one was able to point the following fracture families: N60-70°E N40-50°W, N10-20°W and N30-40°E.

In the study area it occur two main aquifers: (1) a phreatic aquifer, unconfined, porous to porous-fissured type, and (2) a deeper aquifer, confined to semi-confined and fissured.

The phreatic aquifer evolved in all micro-basin and its morphology is intimately related with the topography. The groundwater presents an average temperature of 12.5°C, a pH ranging between 5.0 and 6.7 and a low electrical conductivity (50 to 150 µS/cm);

The deeper aquifer expresses hydrominerothermal characteristics. This aquifer has its major spring in the site of Termas da Touca, associated to N10-20°W faults. This thermal water has a pH close to 9.0, a temperature of 17.5°C and an electric conductivity of 320 µS/cm. The results of the chemical analysis of this water express the following:

- *A sodium-bicarbonated facies; it is sulphurous and fluoridated and is weakly mineralized, with alkaline and soft reaction.*
- *The water is saturated in oxides, hydroxides, carbonates and sulphides of iron, as well as, fluorite, sulfur, talc and quartz;*
- *The hydrogeochemical indexes show that water has typical characteristics of a circulating water in granitic rock, deep circulation and high residence time flow where there is ion exchange and the change in bedrock, for silicates.*
- *The geothermometers (silica, Na/K, Mg/Li and K/Mg) show temperature values, inside the reservoir, between 60 to 99°C.*

Key-words: *“Termas da Touca”; “Granite”; “Hydrogeology”; “Aquifer”; “Hydrodynamics”; “Hydrogeochemistry”; “Conceptualize modelling”*

Índice Geral

1- Introdução	1
1.1- Objetivos	2
1.2- Metodologia	3
2- Enquadramento Regional	4
2.1- Enquadramento Geográfico e Administrativo	4
2.2- Enquadramento Geológico	5
2.3- Enquadramento Hidrológico e Climatológico	7
2.3.1- Bacias Hidrográficas	7
2.3.2- Climatológico	8
2.3.3- Temperatura	10
2.3.4- Precipitação Atmosférica	11
2.3.5- Evapotranspiração	13
2.3.6- Escoamento superficial	14
2.3.7- Superavit hídrico	16
2.3.8- Recarga aquífera	17
3- Enquadramento Local	19
3.1- Enquadramentos Topográfico e Hidrográfico	19
3.2- Enquadramento Geológico e Estrutural	22
3.2.1- Geologia da Bacia da Ponte da Munheca	22
3.2.2- Tectónica da Bacia da Ponte da Munheca	27
3.3- Uso e ocupação do solo	31
4- Hidrogeologia	35
4.1- Hidrogeologia física - Fundamentos teóricos	35
4.1.1- Classificação hidrogeológica	35
4.1.2- Propriedades das unidades aquíferas	37
4.1.3- Caracterização hidrogeológica local	40
4.1.4- Piezometria do Aquífero freático	48
4.2- Hidroquímica	53
4.2.1- Inventário de pontos de água	53
4.2.2- Água das Termas da Touca (minerotermal)	62
4.2.3- Composição química da água das Termas da Touca (AC2)	64
4.2.4- Índices hidrogeoquímicos	73
4.2.5- Geotermómetros	76

4.3- Modelo Hidrogeológico Conceptual	79
5- Conclusões e Recomendações.....	84
5.1- Conclusões	84
5.2- Recomendações	85
Referências bibliográficas.....	87

Índice de Figuras

Figura 1- Enquadramento geográfico e administrativo da área em estudo na NUTS III, criado no software ArcGis 10.3.1 e editado em Adobe Illustrator CC 2015, segundo Regulamento (UE) n.º 868/2014.....	4
Figura 2- Carta geológica regional, adaptado de Machadinho, 2014.....	5
Figura 3- Portugal Continental com enquadramento da bacia hidrográfica do Tejo e da Ponte da Munheca, criado no software ArcGis 10.3.1, com dados de Atlas da Água (1995-2010).....	7
Figura 4- Portugal continental com a classificação climática de Köppen-Geiger, criado no software ArcGis 10.3.1, com base em Kottek et al. (2006).....	9
Figura 5- Carta das temperaturas médias anuais para a área em estudo e sua envolvente, criado no software ArcGis 10.3.1, com base nos dados de Atlas da Água (1995-2010).....	10
Figura 6- Mapa da precipitação atmosférica média anual na área em estudo e sua envolvente, criado no software ArcGis 10.3.1, com base nos dados de Atlas da Água (1995-2010).....	11
Figura 7- Carta com os valores de evapotranspiração real, criado no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).....	13
Figura 8- Carta com os valores calculados do escoamento de Temez, criado no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).....	15
Figura 9- Carta dos valores calculados de ppma-ET, criada no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).....	16
Figura 10- Carta de valores aproximados da recarga aquífera regional, criada no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).....	17
Figura 11- Modelo Digital Terreno (MDT) da bacia hidrográfica da Ponte da Munheca com delimitação da sub-bacia da Touca, criado no software ArcGis 10.3.1 a partir de dados altimétricos das imagens ASTGTM2_N40W008 e N39W008.....	20
Figura 12- Delimitação e rede de drenagem mais relevante nas bacias da Ponte da Munheca, da Touca e da micro-bacia da ribeira do Ameal, criada com o software ArcGis 10.3.1 e editado com Adobe Illustrator CC 2015 a partir de dados do Atlas da Água (1995-2010).....	21

Figura 13- Geologia da bacia hidrográfica da Ponte da Munheca, criada com o software ArcGis 10.3.1, com base em dados do geoPortal do LNEG (2010).....	23
Figura 14- Carta Tectónica da Bacia da Ponte da Munheca, com falhas cartografadas na carta geológica 1:500000 e alinhamentos estruturais inferidos a partir do MDT, criado no software ArcGis 10.3.1.....	27
Figura 15- Aspetos do granito monzonítico porfiroide na zona em estudo: a) afloramento granítico com elevado grau de alteração e inúmeras fraturas, b) afloramento granítico relativamente são, c) afloramento granítico com fraturação bem visível, d) afloramento granítico com elevada densidade de fenocristais, e) amostra de mão de um granito são e f) amostra de mão de um granito mais alterado.	29
Figura 16- Mapa tectónico da zona estudada -micro-bacia da rib ^a do Ameal, (linhas preenchidas correspondem a fraturação medida e as linhas a tracejado correspondem a fraturas prováveis). A fraturação a verde foi extraída de Acavaco (2000).....	30
Figura 17- Carta do uso e ocupação do solo caracterizada pelos níveis 1, da bacia da Ponte da Munheca. Dados de COS 2007 (IGP, 2010).....	32
Figura 18- Carta do uso e ocupação do solo caracterizada pelos níveis 2, da bacia da Touca. Dados de COS 2007 (IGP, 2010).....	33
Figura 19- Mapa da zona estudada com a micro-bacia hidrográfica da ribeira do Ameal (mb RA) e representação da rede de drenagem assim como do uso e ocupação dos solos (sobre imagem da ESRI).....	34
Figura 20- Perfil típico de rochas fraturadas em clima temperado (Godard, 1977). .	36
Figura 21- Localização dos pontos de água inventariados na bacia hidrográfica da ribeira do Ameal, criado no software ArcGis 10.3.1, a partir dos dados da tabela 5.	42
Figura 22- Alguns aspetos dos pontos de água identificados na área em estudo: a) Poço de alvenaria (P15) nas proximidades das Termas da Touca. b) Mina de água, provavelmente situada em caixa e falha. c) Charca ou charco (C3), com notória descida do nível freático. d) ribeira do Ameal em julho de 2015; e) Aspeto do furo F3.	43
Figura 23- Esquema ilustrativo do nível freático em poços e charcas (em muitas situações equivalentes a linhas de água), criado em Adobe Illustrator CC 2015.	44
Figura 24- Estrutura geral e logs litológicos dos furos AC1 e AC2 nas Termas da Touca (adaptado de ACavaco, 2000), integrados no Plano de Pesquisa e Prospeção	

na Área de Concessão das Termas da Touca. Desenho construído com software RockWorks 16 versão 2015.5.6.....	46
Figura 25- Aspeto do furo AC2: tubagem em aço inox, e respetivo equipamento para bombagem e canalização da água.....	48
Figura 26 - Carta de fluxo subterrâneo na micro-bacia da ribeira do Ameal no mês de fevereiro de 2015, criada com o software Surfer 12.0.626 (Golden Software, 2014).	50
Figura 27 – Carta de fluxo subterrâneo na micro-bacia da ribeira do Ameal no mês de maio de 2015, criada com o software Surfer 12.0.626 (Golden Software, 2014).	50
Figura 28- Carta da variação do nível freático entre fevereiro e maio de 2015, criada com o software Surfer 12.0.626 da Golden Software (2014) a partir das Figuras 26 e 27.	52
Figura 29- Mapa com os valores de condutividade elétrica, corrigidos para 20 °C, medidos entre fevereiro e maio de 2015.	56
Figura 30- Mapa com os valores de pH, corrigidos para uma temperatura de 20 °C, medidos entre fevereiro e maio de 2015	57
Figura 31- Mapa com os valores de Eh, com correção térmica, medidos entre fevereiro e maio de 2015.....	58
Figura 32- Gráfico com a relação pH / condutividade elétrica das águas amostradas.	60
Figura 33- Gráfico com a relação pe / condutividade elétrica das águas amostradas.	60
Figura 34- Diagrama com a relação pe / pH para as águas amostradas (adaptado de Johnson et al., 1989).	61
Figura 35- Diagrama de Piper, com a classificação da água das Termas da Touca nas diferentes análises.....	71
Figura 36 – Mapa com a localização do perfil utilizado para o modelo conceptual enquadrado na micro-bacia, criado com o software ArcGis 10.3.1, com imagem ESRI de base.....	82
Figura 37 – Modelo hidrogeológico conceptual, nas envolventes das Termas da Touca, com o perfil NW-SE determinado, criado com o software Adobe Illustrator CC 2015, com base em dados referidos em capítulos anteriores.	83

Índice de Tabelas

Tabela 1- Coordenadas geográficas, cotas e período de funcionamento dos postos udométricos (PU) existentes na região em estudo	12
Tabela 2- Valores da precipitação média mensal medidos em cada PU durante o seu tempo de funcionamento.	12
Tabela 3- Precipitação média nos três PU, assim como os seus valores máximos e mínimos.....	12
Tabela 4- Valores da condutividade hidráulica para rochas ígneas e metamórficas (meios fraturados) (adaptado de Domenico e Schwartz, 1990).....	39
Tabela 5- Enquadramento geográfico dos pontos de água reconhecidos no domínio estudado (mb RA).	41
Tabela 6- Dados relativos aos parâmetros físicos medidos nos diferentes pontos de água em cada campanha.	49
Tabela 7 – Interpretações acerca de alguns parâmetros analisados nas cartas de fluxo das duas campanhas.....	51
Tabela 8- Parâmetros físico-químicos da água medidos in situ nos pontos inventariados.	54
Tabela 9- Relações interparamétricas utilizadas e respetivas interpretações.....	61
Tabela 10- Parâmetros físico-químicos da água emergente nas Termas da Touca (AC2 e F3), (*) Furo particular situado 100 m a E de AC2.	63
Tabela 11- Dados das análises químicas referentes as espécies de aniões e catiões existentes na água captada em AC2. (<) Valor inferior ao limite detetável.	65
Tabela 12- Descrição de alguns parâmetros físico-químicos da água analisada, em diferentes análises, no furo AC2 (valores obtidos na modelação com o PHREEQCi)	67
Tabela 13- Principais espécies iónicas e suas molaridades obtidas no software PHREEQCi.....	68
Tabela 14 – Índices de saturação da água nas diferentes fases minerais.	72
Tabela 15- Índices hidrogeoquímicos, intervalos de variação e seu significado, extraídos de Hem (1985).....	74
Tabela 16 - Índices hidroquímicos calculados pelo software AquaChem (v.4.0) (segundo Oliveira, 2011).	74

Tabela 17 – Valores obtidos das razões apresentadas assim como o valor de coeficiente da correlação de Pearson. “ $r=meq$ ”	75
Tabela 18 - Valores médios para cada geotermómetro utilizado e respetivos autores dos geotermómetros.....	77
Tabela 19- Características hidrogeológicas do aquífero superior freático.....	80
Tabela 20 – Características hidrogeológicas do aquífero profundo.....	81

Índice de abreviaturas

APA	Associação Portuguesa do Ambiente
ARH Centro	Administração da Região Hidrográfica do Centro
BH	Bacia Hidrográfica
CE	Condutividade Elétrica
Cos 2007	Carta Ocupação dos Solos 2007
Eh	Potencial redox relativo a meia reacção do par H_2/H^+ (V)
ET	Evapotranspiração
GPS	Global Positioning System
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IS	Índices de Saturação
Lat.	Latitude
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
Long.	Longitude
mb RA	micro-bacia da ribeira do Ameal
MDT	Modelo Digital de Terreno
ne	Porosidade efetiva
NF	Nível Freático
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
N1	Nomenclatura tipo 1
N2	Nomenclatura tipo 2
Pe	Potencial de Redução
pH	$-\log [H^+]$
ppma	Precipitação média anual
PU	Postos Udométricos
Rib ^a	Ribeira
RS	Resíduo Seco
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
T	Temperatura
UE	União Europeia
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
ZCI	Zona Centro Ibérica

1- Introdução

A água é um bem essencial para a vida na Terra. Constitui para o Homem um importante elemento de desenvolvimento das civilizações, no que respeita à saúde, necessidades básicas e desenvolvimento económico, através de diversas atividades industriais, exploração de recursos geológicos, produção de energia, turismo e atividades recreativas.

Uma importante fração da água que está disponível para consumo humano é proveniente de massas de água subterrânea (corresponde a cerca de 30% do total de água doce do Planeta). Quando se pensa na água como recurso natural, podem considerar-se diversos tipos de utilizações (Hipólito & Vaz, 2011):

- Utilizações para fins que são indispensáveis à vida, à saúde e bem-estar das pessoas;
- Utilizações de consumo público: escolas, hospitais, comércio e serviços;
- Utilizações para fins económicos, sendo a água utilizada como fator económico;
- Utilizações ligadas à gestão e conservação ambiental.

A água do aquífero freático, é de vital importância tanto para o meio ambiente como para o próprio consumo humano. Isto deve-se ao facto deste nível aquífero “abastecer” as massas de água superficiais (linhas de água, poços charcos, barragens, etc.), água esta que é utilizada pelo Homem para diversos fins, desde a rega de campo agrícolas ao consumo humano.

A zona Centro Interior de Portugal Continental, é provavelmente a mais rica do país no que se refere à existência de águas minerais e minerotermais, sendo que neste conjunto, há um significativo número de emergências de águas sulfúreas, e entre elas, a das Termas da Touca.

Segundo Custodio & Llamas (2001) o termo *água mineral* é muito ambíguo, pois umas vezes são consideradas águas minerais aquelas que possuem valores de sais dissolvidos superiores aos da água potável, mas também são consideradas águas minerais as que têm valores anormalmente altos de alguns constituintes como CO₂, HCO₃⁻, S²⁻, Fe²⁺, entre outros, mesmo que a quantidade de sais dissolvida seja inferior à da água potável. Segundo Schoeller (1962, citado em Custodio & Llamas, 2001) quando a temperatura de emergência é pelo menos 4 °C superior ao valor da temperatura média anual local considera-se esta como sendo uma água termal. No caso da água captada nas Termas da Touca podem juntar-se os dois termos, designando por isso esta água como sendo minerotermal.

Em 1923, Charles Lepierre fez o primeiro estudo físico-químico com a água das Termas da Touca (na altura seria feita exploração da água através de um poço), e classificou a água como sendo hipossalinas, sulfúreas-sódicas, bicarbonatadas mistas (sobretudo bicarbonatadas sódicas), silicatadas, fluoretadas, litínicas, sulfatadas e cloretadas-sódicas. No mesmo relatório conclui ainda que a água da

Touca é hipotermal, é isenta de contaminações, bacteriologicamente puríssima e que é uma água bastante radioativa.

A água explorada nas Termas da Touca tem características comuns com outras águas sulfúreas presentes na região.

No presente trabalho faz-se a caracterização hidrogeológica dos terrenos envolventes às Termas da Touca.

1.1- Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização hidrogeológica das Termas da Touca e suas envolventes– micro-bacia hidrográfica enquadrante das Termas -, de modo a conhecer melhor o tipo de aquíferos e a hidrodinâmica subterrânea naquele domínio.

O estudo hidrogeológico inclui as seguintes etapas:

- A classificação hidrogeológica das litologias e estruturas locais;
- A caracterização hidrogeoquímica da água subterrânea minerotermal;

Sugere-se ainda uma definição da hidrodinâmica subterrânea, dos processos de recarga e descarga das unidades aquíferas locais e desenvolveu-se de um modelo hidrogeológico conceptual.

Com este trabalho pretende-se aumentar o conhecimento da hidrogeologia local, tanto a nível hidrodinâmico como hidroquímico.

No âmbito da caracterização hidrogeológica local, foram delineados os seguintes objetivos complementares:

- Caracterização litológica e estrutural, local e regional;
- Reconhecimento do uso e ocupação dos solos na área estudada;
- Levantamento e reconhecimento de pontos de água locais;
- Caracterização físico-química *in situ* de pontos de água selecionados (poços, minas, linhas de água e furos);
- Interpretação e modelação química da água minerotermal;
- Determinação da temperatura da água no reservatório e a sua profundidade.

1.2- Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho incluiu:

- Consulta bibliográfica;
- Atividades de campo;
- Atividades de gabinete.

Numa fase inicial, e após os primeiros reconhecimentos de campo, delimitou-se a área de estudo - bacia hidrográfica envolvente das Termas da Touca.

Através da pesquisa bibliográfica procedeu-se à caracterização climatológica, hidrográfica, geológica, geomorfológica, uso e ocupação de solos e administrativa regional.

Os trabalhos de campo englobaram os seguintes aspetos:

- Caracterização geológica local;
- Inventariação dos pontos de água;
- Medição *in situ* de níveis piezométricos e parâmetros físico-químicos;
- Reconhecimento do uso e ocupação da superfície.

Com os dados obtidos nas diversas fases de investigação, foram criadas bases de dados geológicos, hidroclimatológicos e hidrogeológicos (hidrofísicos e hidroquímicos)

No desenvolvimento deste trabalho utilizaram-se diversos *softwares* como, por exemplo:

- PHREEQCi (Parkhurst & Appelo, 2013) para obter as principais espécies iónicas, as suas concentrações e os índices de saturação em alguns minerais;
- RockWorks 16, versão 2015.5.6, para elaboração dos *logs* dos furos AC1 e AC2;
- Surfer 12.0.626, da Golden Software (2014), para representação das cartas piezométricas;
- ArcGis 10.3.1, para a elaboração de mapas;
- Adobe Illustrator CC 2015 para a edição de diversos mapas e na realização do modelo conceptual;
- Microsoft Excel, Word e PowerPoint 2013 para a realização de textos, tabelas, gráficos e apresentação.

2- Enquadramento Regional

Neste capítulo fazem-se os enquadramentos regionais da área estudada, nomeadamente a nível, Geográfico e Administrativo (1); Geológico (2) e Hidrológico e Climatológico (3).

2.1- Enquadramento Geográfico e Administrativo

De acordo com o Dec. Lei 244/2002 de 5 de Novembro, a área estudada pertence a Portugal Continental (NUTS I), enquadra-se na Região Centro (NUTS II), e mais concretamente nas sub-regiões da Beira Baixa (concelhos de Castelo Branco, Idanha-a-Nova e Penamacor) e na sub-região das Beiras e Serra da Estrela (concelho do Fundão) (NUTS III) (*Regulamento (UE) n.º 868/2014*). A área mais local situa-se no concelho do Fundão e freguesia de Alpedrinha (Fig.1). Nesta região, a Administração da Região Hidrográfica do Centro (ARH Centro) da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é a responsável pela gestão das massas de água.

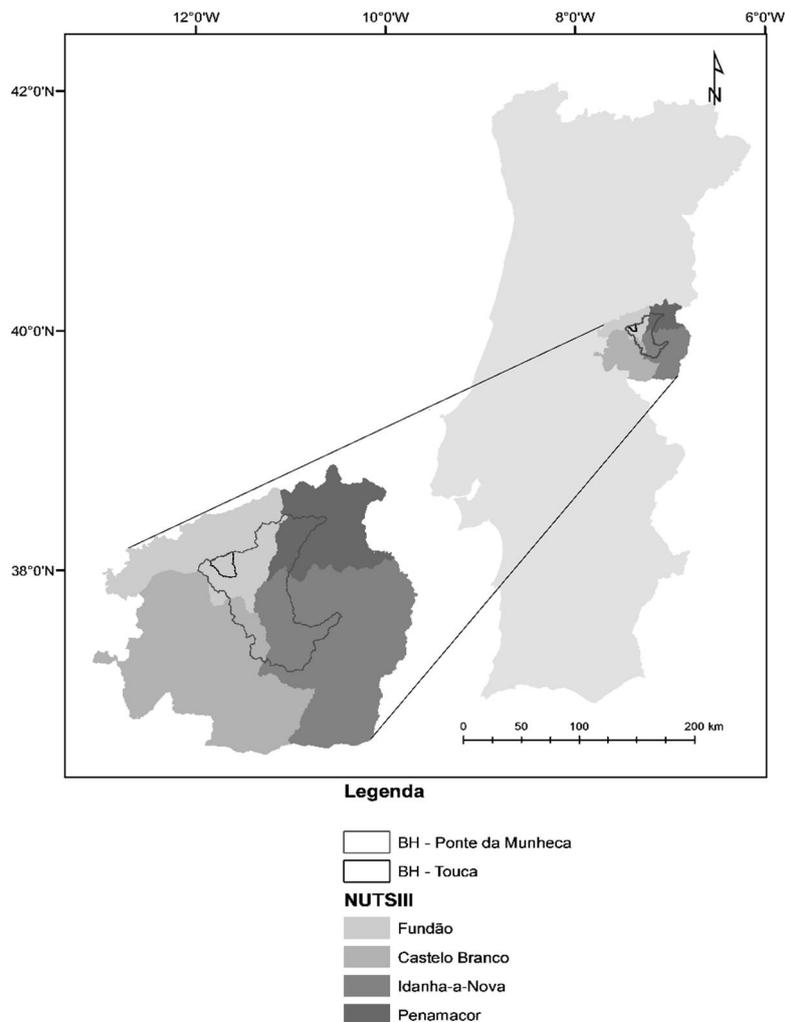
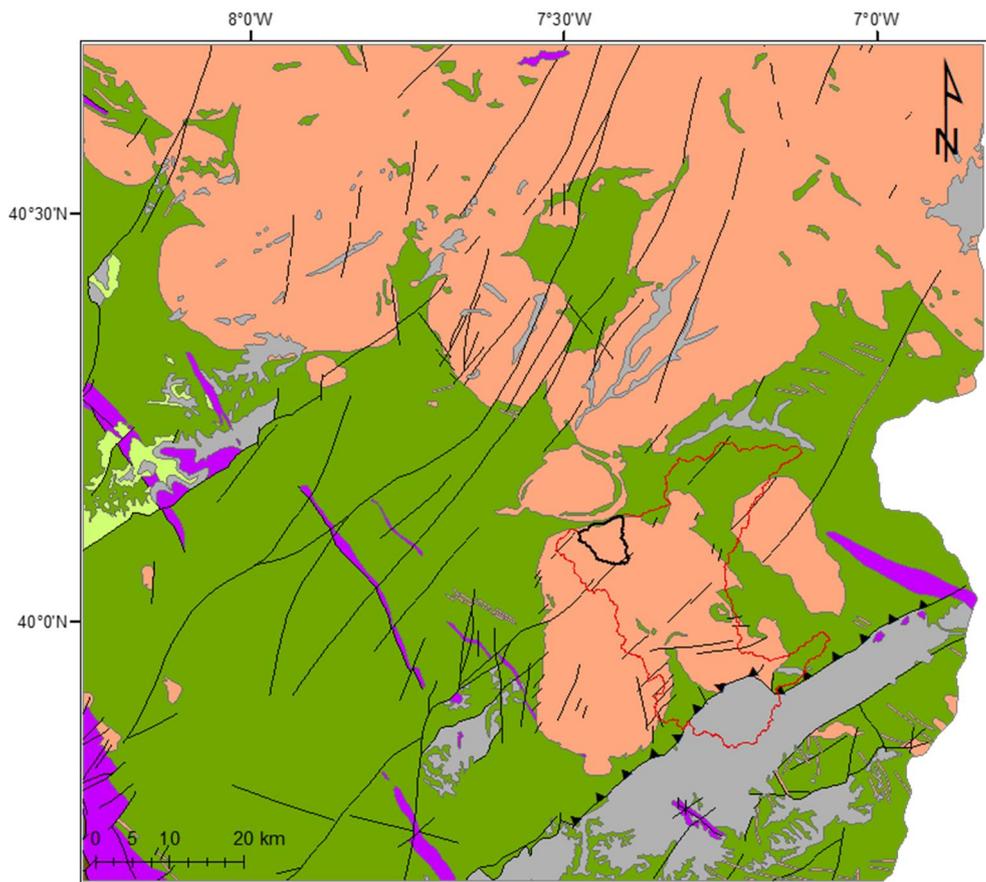


Figura 1- Enquadramento geográfico e administrativo da área em estudo na NUTS III, criado no software ArcGis 10.3.1 e editado em Adobe Illustrator CC 2015, segundo Regulamento (UE) n.º 868/2014.

2.2- Enquadramento Geológico

A região estudada está inserida numa das grandes unidades estruturais da Península Ibérica, a Zona Centro Ibérica (ZCI) (Julivert *et al.*, 1972). A ZCI é caracterizada pela grande extensão que ocupam as rochas granitoides associadas a fases pré-orogénicas a pós-orogénicas do ciclo Varisco, que intruíram metassedimentos afetados por graus de metamorfismo variáveis. Sobre estas rochas depositam-se sedimentos continentais cenozoicos, dispostos em afloramentos descontínuos com orientação preferencial NE-SW, em especial na região E e SE da área (Fig.2) (Romão *et al.*, 2013).



Legenda:

□ BH - Touca

□ BH - Ponte da Munheca

Geologia

■ Cenozoico

■ Mesozoico

■ Rochas intrusivas

■ Paleozoico_Ordovícico, Silúrico, Devónico e Carbónico

■ Grupo das Beiras

■ Proterozoico

— Falha

▲▲ Falha varisca reactivada como cavalgamento alpino

Figura 2- Carta geológica regional, adaptado de Machadinho, 2014.

O Grupo das Beiras é datado do Ediacárico (Neo-proterozoico) ao Devónico, e corresponde na sua generalidade a uma alternância de metagrauvaques e xistos com uma espessura quilométrica. Esta sucessão turbidítica teve origem na alimentação detrítica a partir de leques submarinos associados a cortejos de baixo nível, que culminam com metassedimentos com uma abundante matéria orgânica, que são característicos de um ambiente profundo mais superficial (Romão & Oliveira, 2001).

Na ZCI ocorrem numerosas dobras, geralmente sinclinais, alongadas muitas vezes segundo a direção NW-SE, onde, assentando em discordância angular sobre o Grupo das Beiras, ocorrem espessas bancadas de quartzitos da Formação dos Quartzitos Armoricanos, a que se podem seguir sequências essencialmente xistentas, do Ordovícico e Silúrico, podendo ir até ao Devónico (Almeida *et al.*, 2000a).

Sobrepõem-se ao Grupo das Beiras, ainda que de forma discordante, conjuntos de sequências transgressivas e regressivas de origem pré-Varisca, datadas do Câmbrico superior/Ordovícico inferior ao Devónico. Esta ciclicidade e variação paleogeográfica, tendo em conta as diferenças ambientais de cada unidade conhecida, reflete a evolução de uma plataforma siliciclástica muito extensa e pouco profunda da margem setentrional do Gondwana (Romão & Oliveira, 1995).

As rochas intrusivas, constituídas pelo batólito granítico das Beiras (Granito das Beiras) intruíram a Formação do Grupo das Beiras, que ficou afetada de forma variável pela deformação Varisca polifásica (D_1 , D_2 e D_3). Alguns estudos estruturais recentes mostram que o plutonismo granítico de origem Varisca ocorreu apenas em estádios mais tardios da orogenia, estando relacionado geralmente com a última fase de deformação dúctil (D_3) (Azevedo & Aguado, 2013). Ferreira *et al.*, (1987) subdividiram assim os granitoides Variscos em 4 grupos: ante- D_3 , sin- D_3 , tardi- D_3 e pós- D_3 .

Os processos geológicos relacionados com o ciclo Varisco foram ainda responsáveis pela deformação observada nos metassedimentos que foram afetados por um processo de metamorfismo de grau baixo a muito baixo, que é próprio de condições epizonais (Romão *et al.*, 2013).

Sobre esta sucessão depositaram-se, em discordância angular, sedimentos continentais cenozoicos que integram o setor proximal da Bacia do Baixo Tejo (Beira Baixa e Alto Alentejo). Apesar destes afloramentos se apresentarem de forma descontínua são observados sob uma orientação preferencial NE-SW, que resulta de processos relacionados com a inversão Alpina (Romão *et al.*, 2013).

É possível observar fenómenos que tiveram origem na deformação Varisca a leste de Castelo Branco, na região do Rosmaninhal, onde ocorrem estruturas de interferência a várias escalas (Romão, 1994).

A zona está fortemente marcada por fraturação com orientação preferencial NE-SW e NNE-SSW, havendo ainda alguma quase perpendicular, com orientação NW-SE.

Muitas destas falhas foram rejeogadas devido a movimentos tectónicos posteriores, sendo que também houve algumas que foram reativadas em cavalgamentos pela orogenia Alpina, como é o caso concreto do cavalgamento existente no Rosmaninhal, a sul de Castelo Branco (Romão *et al.*, 2013).

2.3- Enquadramento Hidrológico e Climatológico

2.3.1- Bacias Hidrográficas

Segundo o Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo (PGRHTejo) (APA, 2012), a área estudada pertence à grande Bacia do rio Tejo estando inserida na sub-bacia do rio Ponsul, mais concretamente na bacia hidrográfica (BH) da Ponte da Munheca (Fig.3) que tem uma área de 675 km² (Atlas da Água, 1995-2010). A bacia estudada com maior pormenor é a bacia hidrográfica envolvente das Termas da Touca com uma área plana de 27,5 km².



Legenda

- BH - Tejo
- BH - Ponte da Munheca
- Termas da Touca

Figura 3- Portugal Continental com enquadramento da bacia hidrográfica do Tejo e da Ponte da Munheca, criado no software ArcGis 10.3.1, com dados de Atlas da Água (1995-2010).

O rio Ponsul é um afluente do rio Tejo, com cerca de 85 km de comprimento, que nasce em Penha Garcia, no concelho de Idanha-a-Nova, distrito de Castelo Branco. Desagua na margem direita do rio Tejo, perto de Malpica do Tejo, no concelho de Castelo Branco.

Nesta bacia hidrográfica, a linha de água principal, o rio Ponsul, apresenta um regime de escoamento perene, isto é, no seu canal corre água durante todo o ano. Contudo, na área da bacia existem com elevada abundância linhas de água efémeras (que apenas têm água em períodos de precipitação elevada) e sazonais (apresentam bastante água durante o inverno, mas assim que o período de seca aumenta acabam por ficar sem água).

2.3.2- Climatológico

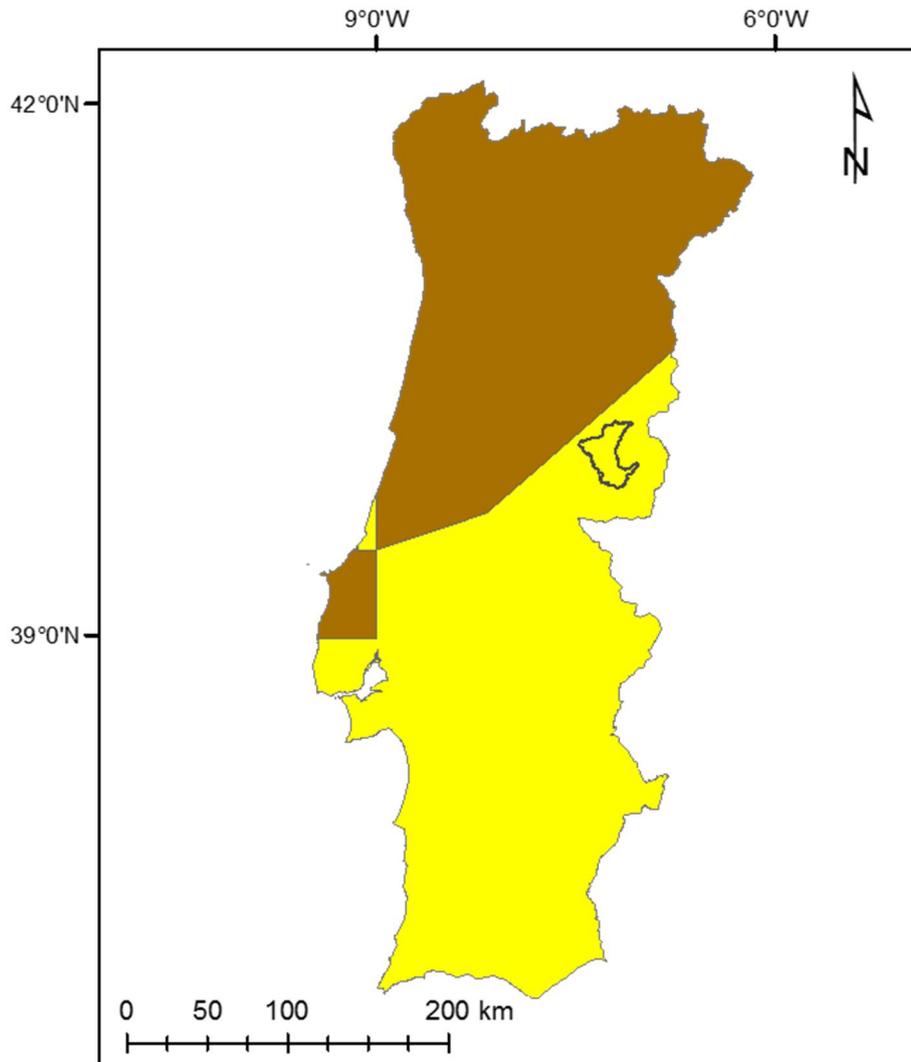
Para o estudo climatológico foi tida em conta a classificação climática de Köppen-Geiger (Fig.4), que se baseia na sazonalidade e nos valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação, para assim se conseguir classificar a zona estudada. A classificação é baseada no pressuposto, com origem na fitossociologia e na ecologia, de que a vegetação natural de cada grande região da Terra é essencialmente uma expressão do clima que nela prevalece (Kottek *et al.*, 2006).

Assim, as fronteiras entre regiões climáticas foram selecionadas para corresponder, tanto quanto possível, às áreas de predominância de cada tipo de vegetação, razão pela qual a distribuição global dos tipos climáticos e a distribuição dos biomas apresenta elevada correlação. Na determinação dos tipos climáticos de Köppen-Geiger são considerados a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação. Cada grande tipo climático é identificado por um código, constituído por letras maiúsculas e minúsculas, cuja combinação resulta nos tipos e subtipos considerados (Esteves, 2009). É possível observar duas zonas climáticas distintas no continente português, estando elas denominadas por Csa e Csb (Kottek *et al.*, 2006).

Decompondo a designação destas zonas (Kottek *et al.*, 2006) podemos obter que:

- “C”- corresponde a um tipo de clima temperado ou temperado quente, de climas mesotérmicos, cuja temperatura média do ar dos 3 meses mais frios está compreendida entre -3 °C e 18 °C uma temperatura média do mês mais quente superior a 10 °C, sendo que as estações de Verão e de Inverno são bem definidas;
- “s” significa que as chuvas ocorrem durante o inverno;
- “a” corresponde a temperatura média do ar no mês mais quente superior ou igual a 22 °C;
- “b” designa zonas em que a temperatura média do ar no mês mais quente é inferior a 22 °C e as temperaturas médias do ar nos 4 meses mais quentes superiores a 10 °C.

A área em estudo enquadra-se num clima do tipo Csa, sendo este correspondente a um clima temperado húmido com Verão seco e quente, tipicamente mediterrânico (Fig.4).



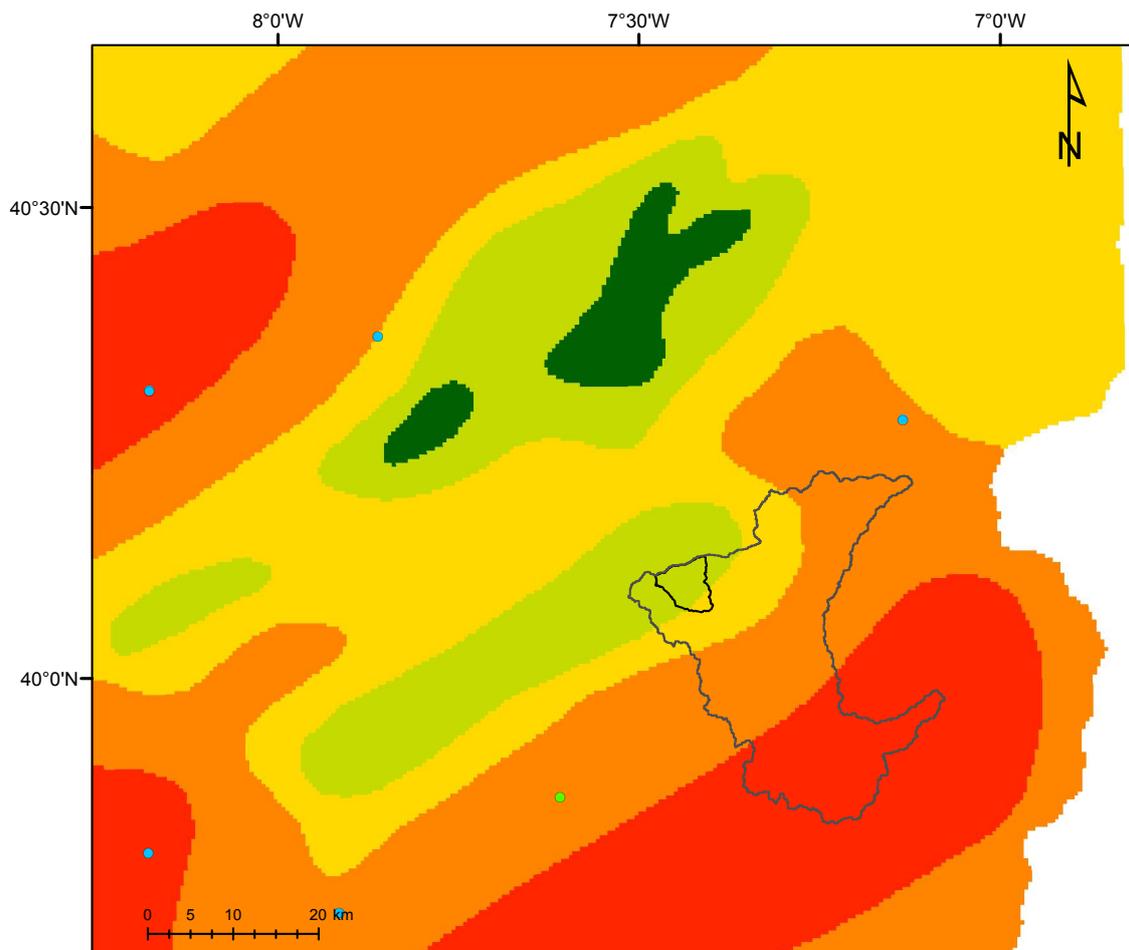
Legenda

-  BH - Ponte da Munheca
-  Csa - Clima temperado húmido com verão quente e seco
-  Csb - Clima temperado húmido com verão seco e temperado

Figura 4- Portugal continental com a classificação climática de Köppen-Geiger, criado no software ArcGis 10.3.1, com base em Kottek et al. (2006).

2.3.3- Temperatura

De acordo com os valores apresentados no mapa da Figura 5, a temperatura média anual não é constante no interior da zona em estudo. Na área da bacia hidrográfica da Ponte da Munheca as temperaturas médias anuais são ligeiramente mais frias a Noroeste e mais quentes a Sudeste. As temperaturas médias mais baixas registadas nesta bacia variam entre os 7,5 °C e os 10 °C, enquanto as mais altas se situam entre os 16 °C e os 17,5 °C.



Legenda

	BH - Ponte da Munheca	Temperatura (°C)		<7,5
	BH - Touca			7,5 - 10
	Rede climatológica			10 - 12,5
	IPMA			12,5 - 15
				15 - 16
				16 - 17,5

Figura 5- Carta das temperaturas médias anuais para a área em estudo e sua envolvente, criado no software ArcGis 10.3.1, com base nos dados de Atlas da Água (1995-2010).

2.3.4- Precipitação Atmosférica

Segundo o mapa apresentado na Figura 6 a precipitação média anual (ppma) na sub-bacia do rio Ponsul decresce de Noroeste para Sudeste, sendo a zona de maior precipitação correspondente a uma zona de maior altitude. Os valores registados mais elevados são da ordem dos 1800 aos 2000 mm/ano e os mais baixos de 400 aos 600 mm/ano.

Quanto à bacia onde estão inseridas as captações das Termas da Touca os valores médios de precipitação são relativamente mais constantes, pois variam de 800 aos 1000 mm/ano como mínimo e 1600 aos 1800 mm/ano como máximo.

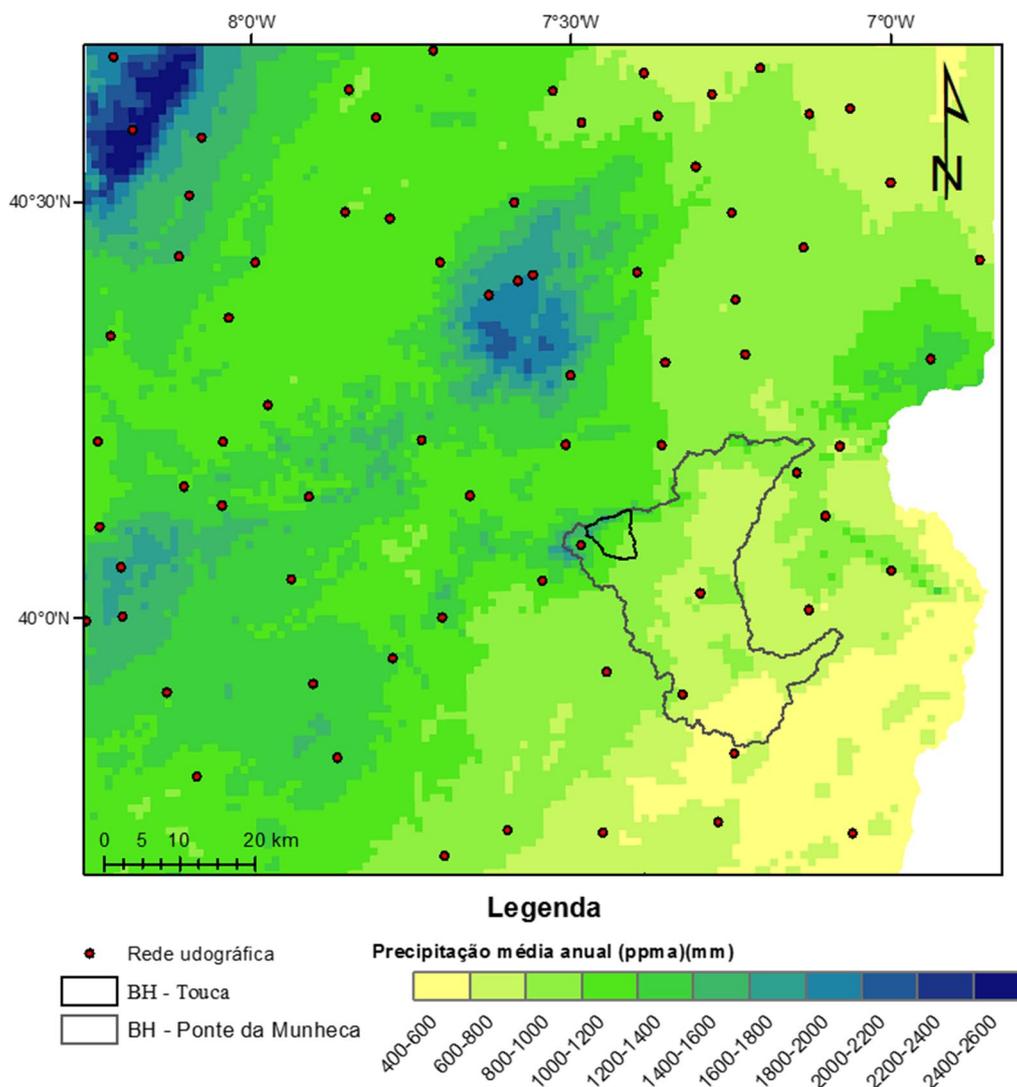


Figura 6- Mapa da precipitação atmosférica média anual na área em estudo e sua envolvente, criado no software ArcGis 10.3.1, com base nos dados de Atlas da Água (1995-2010).

Foram ainda tabelados os valores da precipitação registada entre 1980 e 2010 (SNIRH, 1995-2015) na zona mais a norte desta bacia (zona de maior recarga) nos postos udométricos (PU) de Castelo Novo, Gralhas e Vale de Prazeres (Tab.1 a 3).

Tabela 1- Coordenadas geográficas, cotas e período de funcionamento dos postos udométricos (PU) existentes na região em estudo

	Lat.	Long.	Altitude	Período de funcionamento
Castelo Novo (CN)	40,08100	-7,49800	617 m	1/1/1985 - 1/2/2010
Gralhas (G)	40,08211	-7,48472	565 m	1/1/1980 - 1/12/1984
Vale de Prazeres (VdP)	40,11128	-7,42500	506 m	1/10/1980 - 1/9/1985

Tabela 2- Valores da precipitação média mensal medidos em cada PU durante o seu tempo de funcionamento.

	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ag	Média anual
Castelo Novo	63,9	187,0	229,1	182,5	185,0	136,9	75,8	104,3	77,3	31,7	9,8	13,2	1296,4
Gralhas	41,8	146,0	181,6	164,2	56,5	111,0	83,3	121,0	113,5	42,4	13,7	12,1	1087,2
Vale de Prazeres	44,3	56,3	179,0	120,3	72,8	111,4	57,2	95,9	86,7	26,8	10,1	4,6	865,5

Tabela 3- Precipitação média nos três PU, assim como os seus valores máximos e mínimos.

CN/G/VdP	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Média anual
ppma (1980-2010) (mm)	59,3	161,9	191,8	187,3	156,1	127,4	75,7	103,6	82,3	31,8	10,3	12,6	1200,1
Mín (mm)	1,75	31,1	0	8	0,1	9,3	1,7	22,3	0	0	0	0	
Máx (mm)	224,1	387,8	479,7	857,3	841,8	304,4	250,4	192,7	306,3	241,8	88,8	45	

Tendo em consideração estes valores é possível ver que a maior precipitação ocorre na zona NW da bacia, em Castelo Novo (PU Castelo Novo), onde o valor da precipitação média anual é de aproximadamente 1300 mm/ano. Tendo ainda o mês de novembro o mês com o maior valor de precipitação com uma média de 230 mm/ano, enquanto o mês de julho tem o menor valor com aproximadamente 10 mm/ano.

Nestes locais o valor da precipitação média anual foi de 1200 mm, onde os meses com valores mais elevados foram os de outubro, novembro e dezembro, respetivamente com 161,9, 191,8 e 187,3 mm, enquanto os meses com menor precipitação foram os de junho, julho e agosto, respetivamente com 31,8, 10,3 e 12,6 mm.

2.3.5- Evapotranspiração

Na bacia em estudo os valores de evapotranspiração real média anual (Fig.7) são constantes na maioria da sua extensão, variando entre 600 e 700 mm/ano. Contudo, na parte NW da bacia hidrográfica da Ponte da Munheca os valores são um pouco mais elevados atingindo os 700 a 800 mm/ano, enquanto no lado SE os valores são mais reduzidos, variando entre 500 e os 600 mm/ano.

Na bacia das Termas da Touca, os valores médios anuais de evapotranspiração real variam entre os 500 e 700 mm/ano.

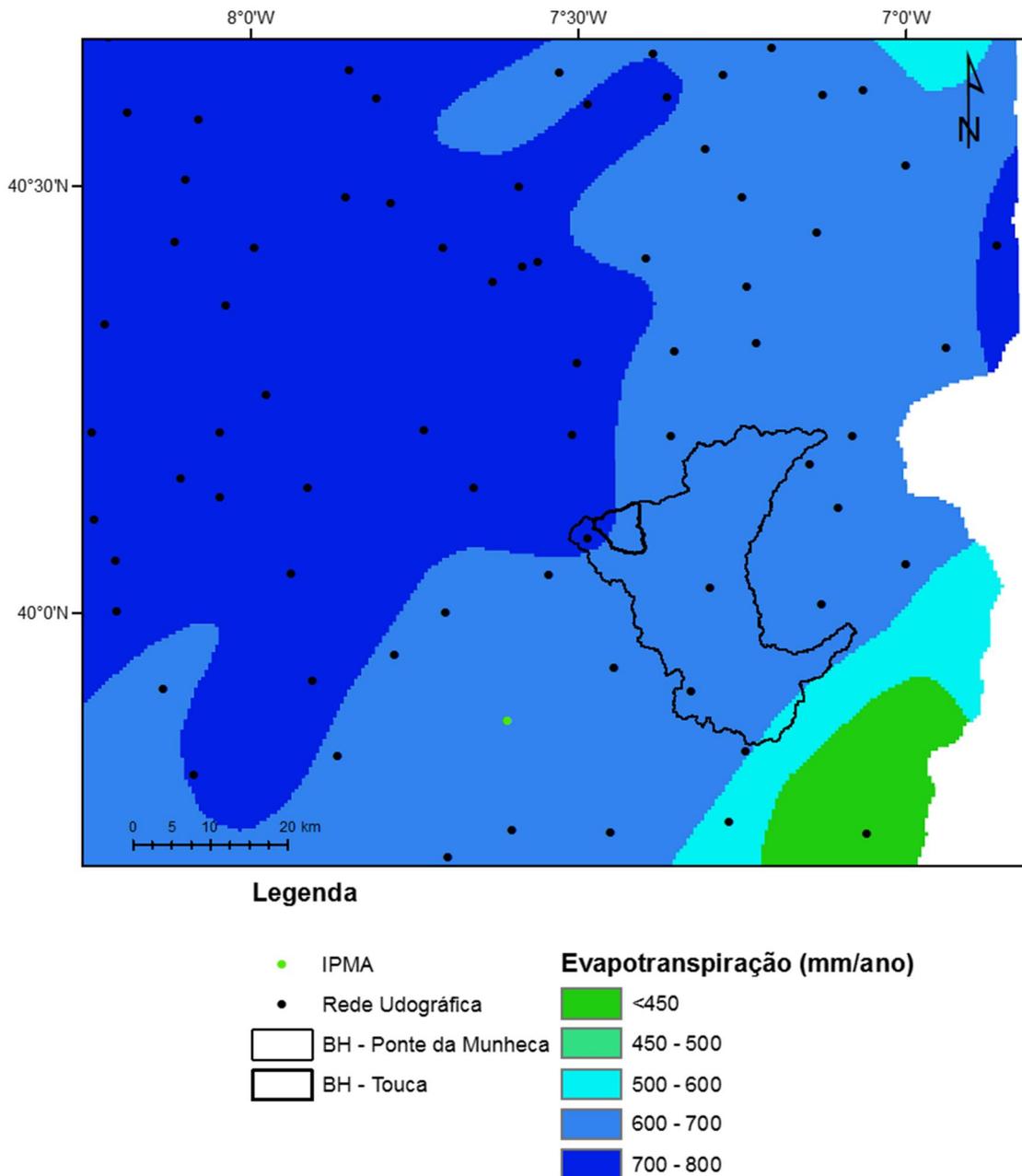


Figura 7- Carta com os valores de evapotranspiração real, criado no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).

2.3.6- Escoamento superficial

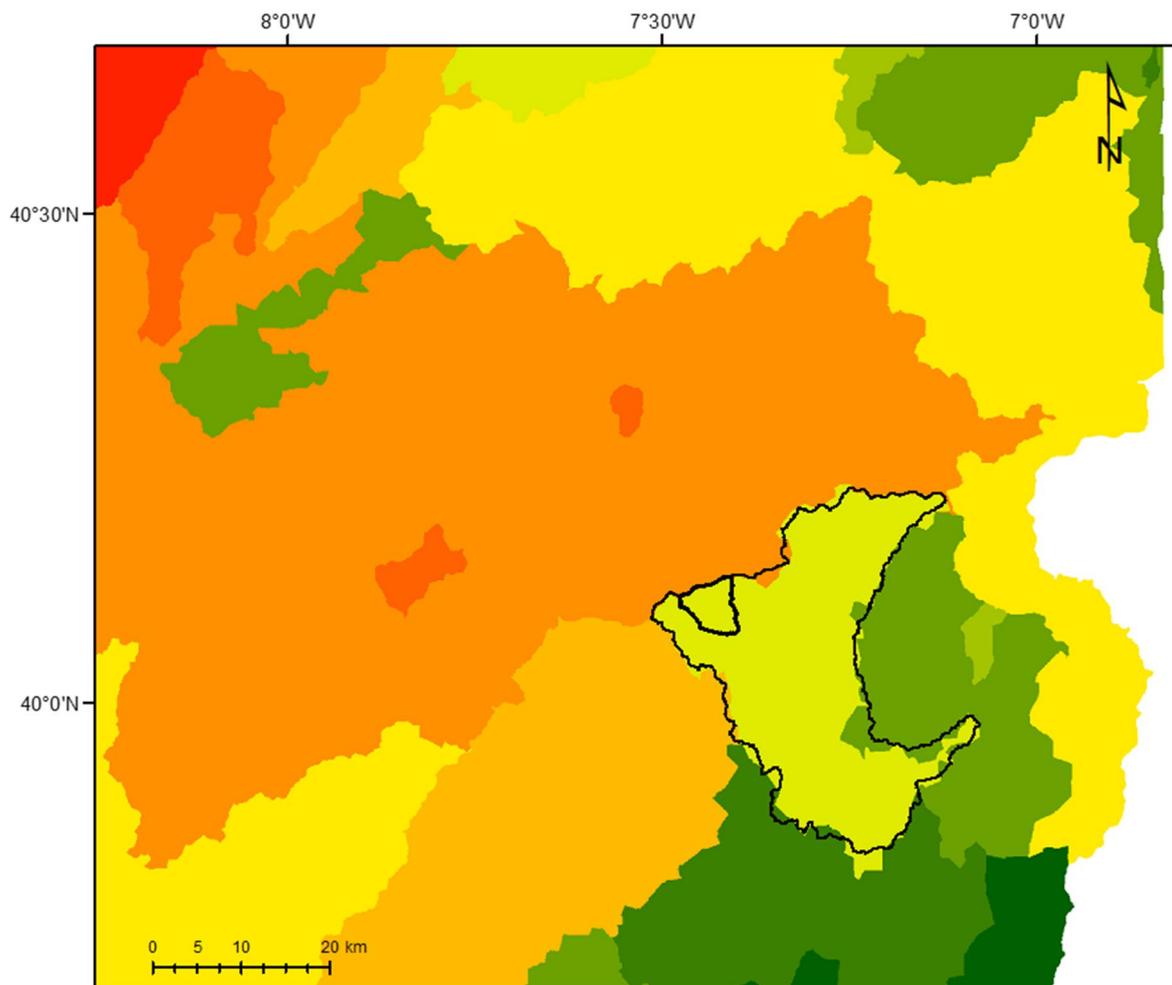
O escoamento (Fig.8) foi determinado tendo em conta o modelo hidrogeológico de Temez (1978), este modelo reproduz os processos essenciais de transporte de água que têm lugar nas diferentes fases do ciclo hidrológico. O processo está de acordo com o princípio da conservação da massa e das leis específicas de transferência entre os distintos termos do balanço (Monreal, 1993).

O modelo considera o solo dividido em duas zonas:

- A camada superior, não saturada, onde coexistem água e ar.
- A camada inferior, o aquífero que se encontra saturado de água, funcionando como um reservatório subterrâneo que descarrega na rede superficial de drenagem (rede hidrográfica).

Denomina-se por excedente, a parcela da água precipitada que não é evapotranspirada somada do armazenamento no solo. O excedente decompõe-se numa parcela que escoia superficialmente e noutra que infiltra até ao aquífero. A primeira escoia num período relativamente curto, enquanto a parcela infiltrada vai alimentando o aquífero, originando descargas ao longo do tempo (Ramalho & Moreira, 2004).

O escoamento de Temez calculado para a bacia hidrográfica da Ponte da Munheca situa-se entre os 283 e os 339 mm/ano.



Legenda

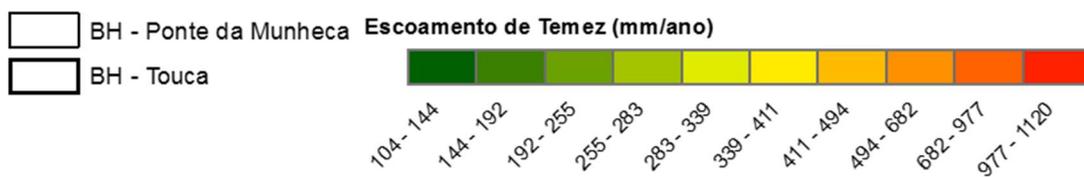


Figura 8- Carta com os valores calculados do escoamento de Temez, criado no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).

2.3.7- Superavit hídrico

Para a obtenção deste mapa foram utilizados os mapas das figuras 6 e 7 a partir dos quais se obteve o mapa apresentado na figura 9, sendo que este corresponde aos valores da precipitação atmosférica (ppma) menos a evapotranspiração (ET) (Fig.9).

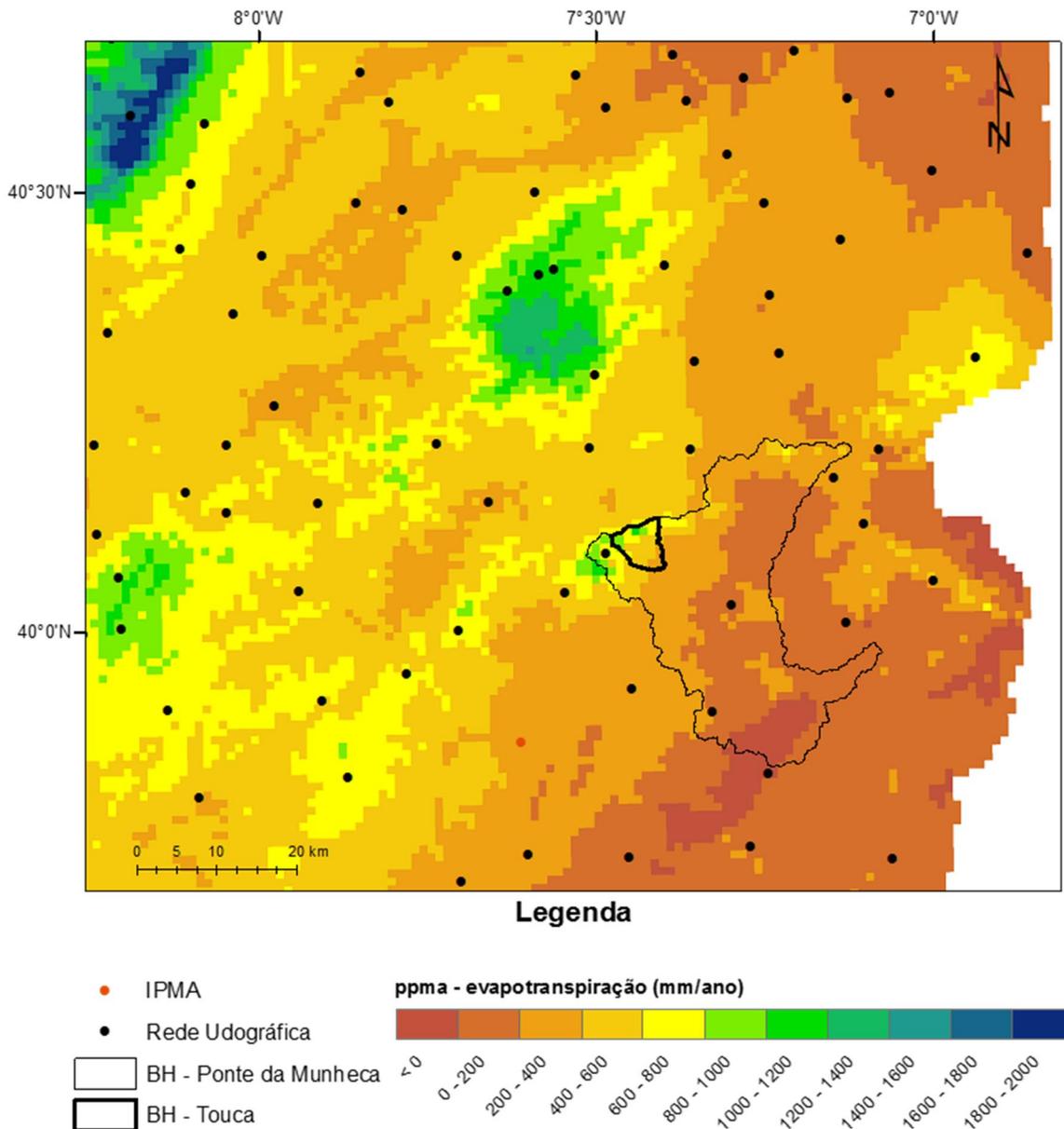


Figura 9- Carta dos valores calculados de ppma-ET, criada no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).

Na carta existem valores negativos (<0 mm/ano), que correspondem a zonas onde existe um déficit de precipitação em relação à evapotranspiração, déficit este que deverá ser diminuído através da existência de massas de água subterrâneas. Os valores para a bacia da Ponte de Munheca neste cálculo tem máximos de 1200 mm/ano e como mínimo valores inferiores a 0.

2.3.8- Recarga aquífera

Para a determinação da recarga aquífera foram tidos em consideração aspetos apresentados anteriormente, sendo eles a precipitação atmosférica, a evapotranspiração e o escoamento superficial (R) (escoamento de Temez). A partir dos mapas anteriormente apresentados fez-se a subtração dos valores de R+ET ao valor da precipitação. Obteve-se deste modo um mapa que se pode dizer ser representativo das zonas onde a recarga aquífera existe (Fig.10).

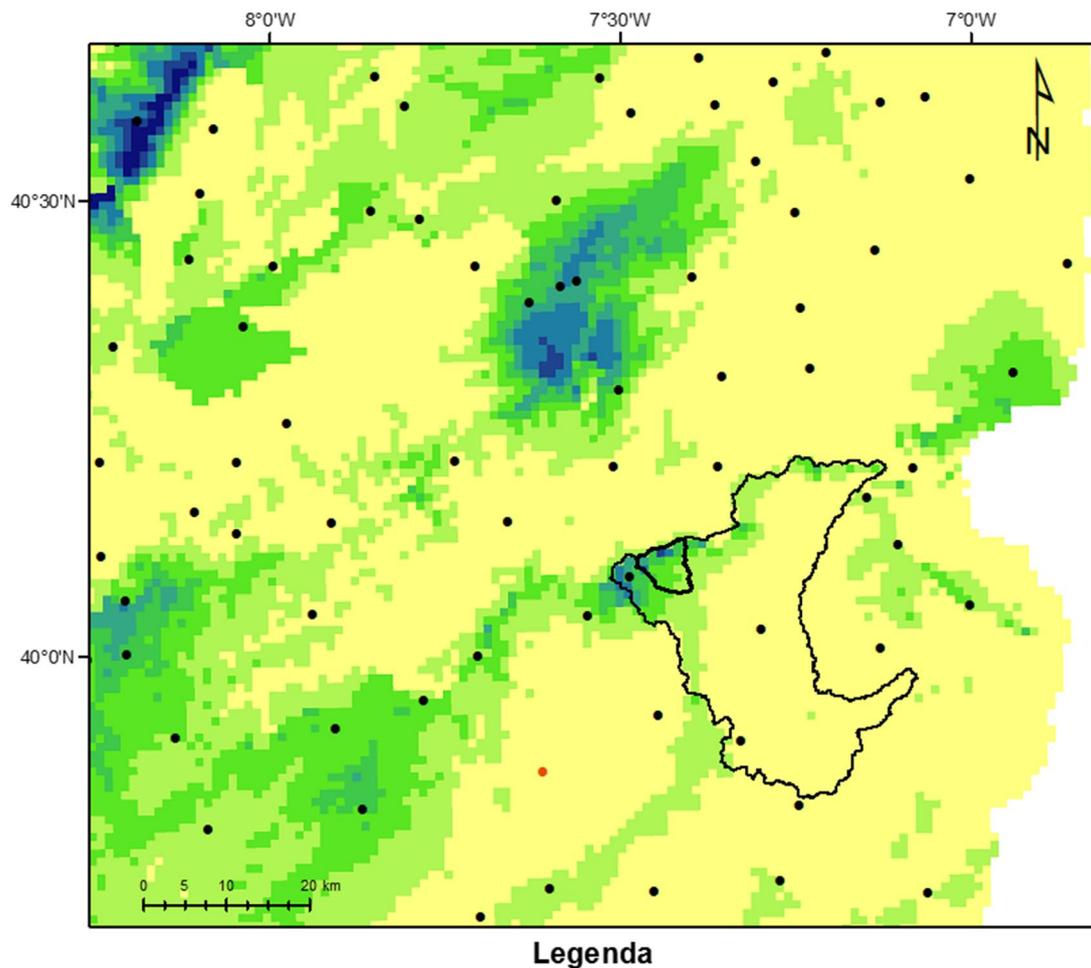


Figura 10- Carta de valores aproximados da recarga aquífera regional, criada no software ArcGis 10.3.1, tendo como base dados do Atlas da Água (1995-2010).

Neste mapa é possível observar que na zona em estudo existe um déficit de recarga aquífera em grande parte da área, sendo exceção a parte N da bacia mais concretamente no lado NW. Neste lado a recarga aquífera faz-se sentir em maior abundância conforme se avança para o limite NW da bacia (zona de maior altitude), onde existe uma elevada recarga, chegando mesmo atingir valores aproximados de 900 mm/ano.

De modo a comparar destes valores foram feitas as contas do balanço hídrico, sendo que para o PU de Castelo Novo (situado a NW na bacia da Ponte da Munheca), foram obtidos valores de aproximadamente 818 mm/ano, valor este relativamente mais baixo que o obtido através da análise do mapa.

Na bacia da Touca os valores mais elevados também coincidem com os locais de maior altitude, onde a infiltração (recarga aquífera) máxima é de 600-750 mm/ano, enquanto o mínimo é de 0-150 mm/ano. Contudo os valores mais representativos variam entre 150 e 300 mm/ano, sendo que estes serão assumidos como sendo a recarga aquífera média anual, na área da bacia da Touca.

Deste modo se usarmos os valores intermédios de cada intervalo, tanto de precipitação como de recarga, obtêm-se os valores da taxa de infiltração, sendo que no caso da Bacia da Ponte da Munheca o valor máximo é de cerca de 47%, enquanto os valores médios da bacia da Touca serão na ordem dos 16%.

Este valor encontra-se em concordância com a ordem de grandeza proposta por outros autores para formações cristalinas do Maciço Antigo. Pereira (1999) calculou um coeficiente de infiltração de 20% da precipitação iria recargar o sistema aquífero subterrâneo da bacia do Tua (citado em Carvalho *et al.*, 2005). Lima & Oliveira Silva (2000) apresentam valores que variam entre 17% e 37% para NW de Portugal e Lima (2001) estimou valores situados entre 14,6% e 21,7% para a região de Braga (citado em Carvalho *et al.*, 2005). Carvalho *et a.*, (2000), referindo-se a estudos realizados a propósito dos planos de bacia hidrográfica dos rio Lima, Cávado, Ave, Leça e Douro, propõem valores médios de recarga de 14% a 17% para as formações cristalinas do Norte de Portugal (citado em Carvalho *et al.*, 2005).

3- Enquadramento Local

Neste capítulo são apresentados os enquadramentos físicos à escala local para a área estudada, nomeadamente a nível (1) topográfico e hidrográfico, (2) geológico-tectónico e (3) do uso e ocupação do solo.

3.1- Enquadramentos Topográfico e Hidrográfico

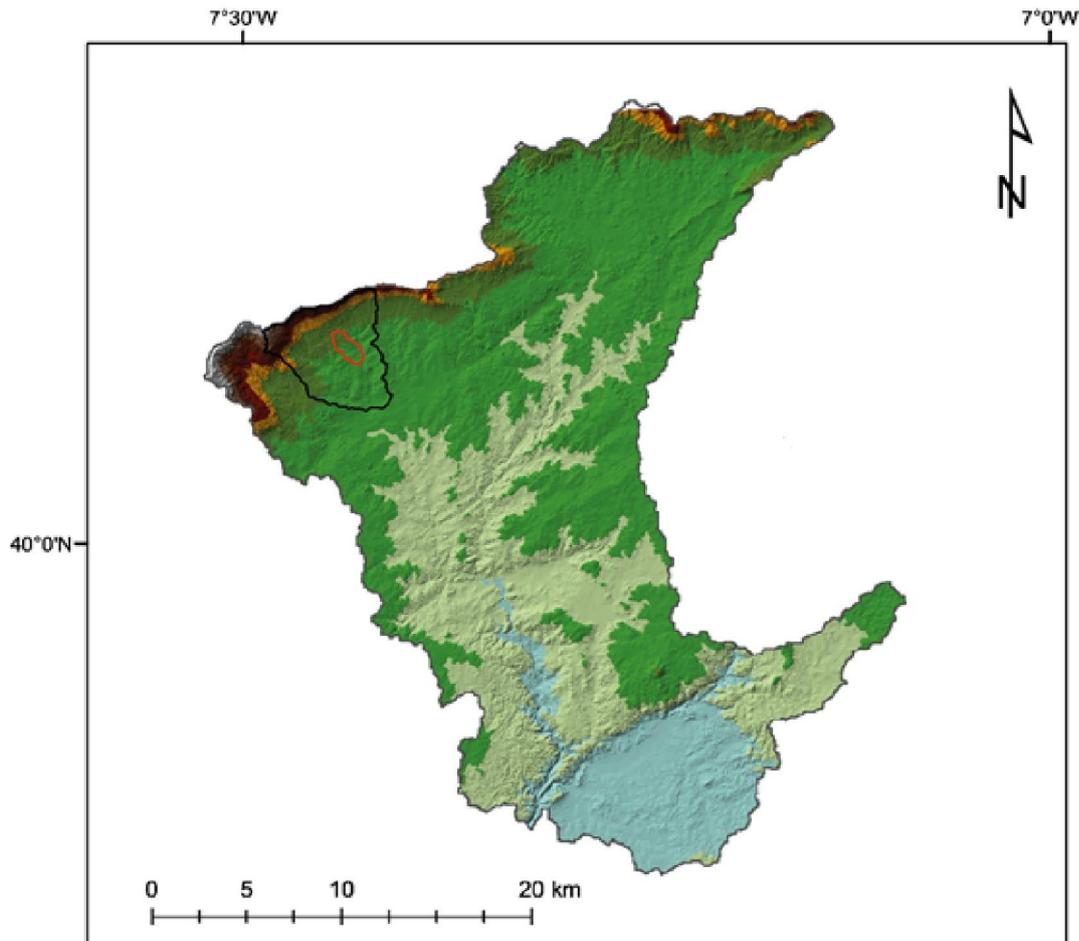
Como referido anteriormente, a área analisada no presente estudo corresponde ao setor médio-terminal da micro-bacia hidrográfica envolvente das Termas da Touca. Será aqui designada por **micro-bacia da ribeira do Ameal (mb RA)**.

Esta micro-bacia - **mb RA** - está incluída na grande bacia hidrográfica do rio Ponsul, nomeadamente na sub-bacia da Ponte da Munheca. A área plana da bacia da Ponte da Munheca é de 675,84 km² (Atlas da Água (1995-2010), devido à sua dimensão está representada em 9 folhas da Carta Militar à escala 1:25 000 (IGeoE, 2000): 246 - Fundão; 247 - Capinha (Fundão); 248 - Penamacor; 256 - Alpedrinha; 257- Pedrogão (Penamacor); 258 – Monsanto (Idanha-a-Nova); 268 – Lardosa (Castelo Branco); 269 – São Miguel de Acha (Idanha-a-Nova); 270 – Alcafozes (Idanha-a-Nova); 280 – Alcains (Castelo Branco); 281 - Idanha-a-Nova; 282 – Zebreira (Idanha-a-Nova); e 293 - Ladoeiro (Idanha-a-Nova)

A topografia apresentada pela sub-bacia da Ponte da Munheca caracteriza-se por ser bastante montanhosa sobretudo no seu setor NW, pois nessa zona situa-se uma importante cadeia montanhosa portuguesa, designada de Serra da Gardunha. Caminhando para E ocorre uma descida abrupta da altitude passando-se do ponto mais alto da bacia, 1211 m, para os 500 m numa distância relativamente pequena (cerca de 2 km). A restante área tem um decréscimo relativamente suave de altitude para S, e onde se podem observar domínios trabalhados pelas linhas de água principais tendo altitudes médias de 256 aos 361 m (Fig.11).

Na parte NW da sub-bacia da Ponte da Munheca insere-se uma bacia mais pequena, bacia da Touca, que inclui as Termas da Touca. Esta bacia tem uma área total de 27,5 km² e está limitada pelas seguintes bacias: a N e a NE por Vale de Prazeres, a S e a SE por Póvoa de Atalaia e a W por Alpedrinha. Encontra-se representada na folha nº256 – Alpedrinha da Carta Militar 1:25000 (IGeoE, 2000). Assim como na bacia descrita anteriormente - sub-bacia da Ponte da Munheca - as cotas mais elevadas encontram-se no setor NW, sendo que na restante área existe uma topografia tipicamente montanhosa, mas com desniveis pouco acentuados (entre os 362 e 574 m).

O domínio estudado - mb RA - insere-se mais concretamente na pequena bacia hidrográfica da Touca, e tem uma área aproximada de 1,64 km² (Fig.11). O relevo na mb RA é no geral suave, inclinando ligeiramente para SE.



Legenda

- BH - Touca
- BH - Ponte da Munheca
- Micro-bacia ribª Ameal

Elevação

- 1105 - 1211
- 999 - 1104
- 893 - 998
- 787 - 893
- 681 - 786
- 575 - 680
- 469 - 574
- 362 - 468
- 256 - 361
- 150 - 255

Figura 11- Modelo Digital Terreno (MDT) da bacia hidrográfica da Ponte da Munheca com delimitação da sub-bacia da Touca, criado no software ArcGis 10.3.1 a partir de dados altimétricos das imagens ASTGTM2_N40W008 e N39W008.

A figura 11 obteve-se através do mosaico feito com as imagens de satélite ASTGTM2_N40W008 e N39W008 com o modelo digital de terreno. As imagens ASTER GDEM, que são um produto do Ministério da Economia, Indústria e Comércio do Japão (METI) e da Administração Aeronáutica e Espacial Norte Americana (NASA), são georreferenciadas em coordenadas geográficas no sistema

WGS84 e estão em formato GeoTIFF, com informação sobre a elevação do terreno em malhas de 1 arco de segundo (cerca de 30 m) na região de estudo.

Quanto ao enquadramento hidrográfico (Fig.12), a mb RA apresenta as seguintes características:

- A bacia é alongada segunda a direção NW-SE;
- Apresenta uma densidade de drenagem média a elevada;
- A linha de água principal - ribeira do Ameal - apresenta no seu troço intermédio e terminal, regime perene; contudo, em anos de maior seca, apresenta regime de escoamento sazonal.

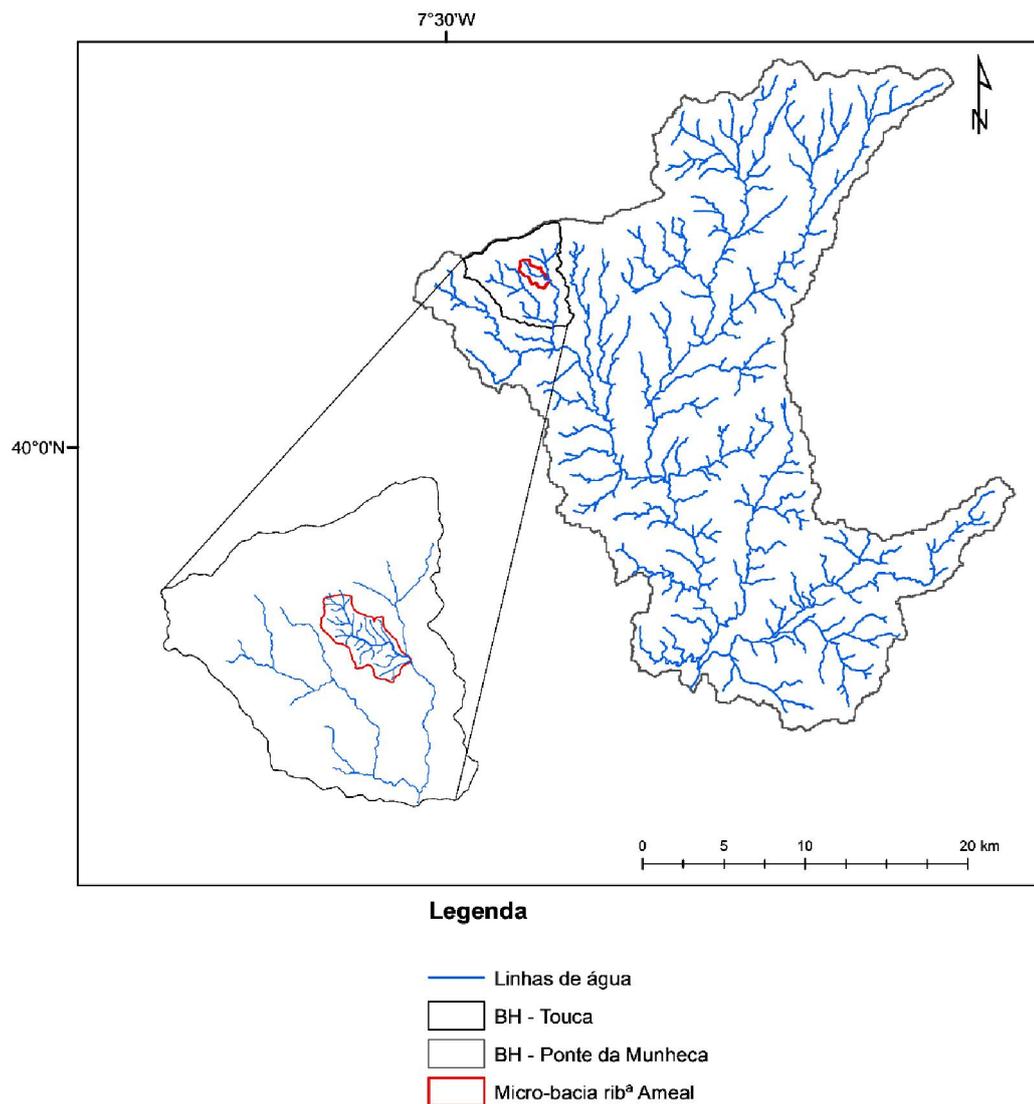


Figura 12- Delimitação e rede de drenagem mais relevante nas bacias da Ponte da Munheca, da Touca e da micro-bacia da ribeira do Ameal, criada com o software ArcGis 10.3.1 e editado com Adobe Illustrator CC 2015 a partir de dados do Atlas da Água (1995-2010).

3.2- Enquadramento Geológico e Estrutural

3.2.1- Geologia da Bacia da Ponte da Munheca

Na bacia hidrográfica da Ponte da Munheca (Fig.13) afloram os dois “supergrupos” litológicos descritos anteriormente nomeadamente: a megassequência metamórfica do **Grupo das Beiras** e as rochas ígneas do **Batólito Granítico da Beira**. A megassequência do Grupo das Beiras foi subdividida em várias formações, são elas: os **conglomerados do Grupo das Beiras**, o **Grupo das Beiras indiferenciado**, a **Formação do Rosmaninhal** e a **Formação de Alameda**.

O **Grupo das Beiras indiferenciado** está datado do Ediacárico (Neo-proterozoico) ao Devónico, e corresponde genericamente a uma alternância de metagrauvaques e xistos com uma espessura quilométrica. Esta sucessão turbidítica originou-se pela alimentação detrítica a partir de leques submarinos associados a cortejos de baixo nível, que culminam com metassedimentos com uma abundante matéria orgânica, que são característicos de um ambiente profundo mais superficial (Romão & Oliveira, 2001).

A **Formação do Rosmaninhal** é na sua base constituída por alternância de filitos escuros, muitas vezes laminados, com conjunto de bancadas de metagrauvaques, por vezes grosseiros e microconglomerados. Estes microconglomerados são formados por areia grosseira que diminui o calibre em direção ao topo, contêm ainda clastos entre os 0,1 e os 4 mm, sendo estes de quartzo, lidito, rocha vulcânica e feldspatos. As bancadas de metagrauvaques mais finas apresentam granulometria mais homogênea e por vezes laminada (Romão *et al.*, 2013).

Na parte superior da formação intercalam-se bancadas de filitos e metassiltitos negros, por vezes grafitosos, com metagrauvaques cinzentos a negros. No topo desta unidade foram ainda cartografados vários níveis de espessura métrica formados por filitos grafitosos com ocorrência de sulfuretos. (Campos, 1996; Campos & Pereira (1991), citados em Romão *et al.*, 2013).

A litofácies característica (bancadas de filitos intercaladas com metagrauvaques) que ocorre na parte inferior da sucessão turbidita sugere uma deposição em planície abissal e progradação de lobos em zona de leque exterior ou médio, enquanto as litologias terrígenas das unidades mais altas poderão ter sido depositadas em canais distributários de leque interior passando a talude continental. Esta deposição em ambiente de talude é ainda evidenciada, na parte superior da Formação do Rosmaninhal pela presença de *slumps*, bem como de conglomerados desorganizados, de geometria lenticular, matriz fosfatada e clastos de natureza variada (como por exemplo, fosfatos, carbonatos, quartzo, pelitos e grauvaques) (Romão *et al.*, 2013).

Estudos geoquímicos e de modas detríticas em metagrauvaques da formação do Rosmaninhal revelaram aportes de material detrítico que derivou de áreas orogénicas recicladas, cuja natureza sedimentar é quartzosa (Romão & Oliveira, 2001).

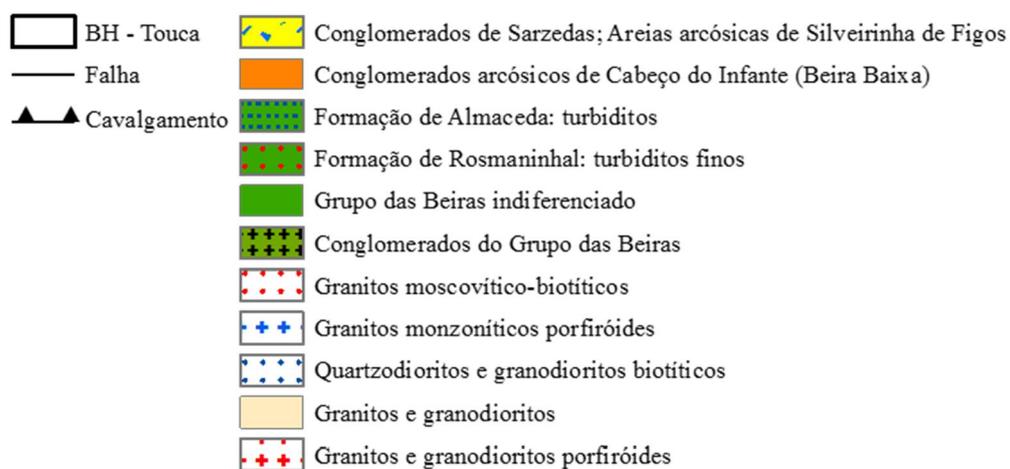
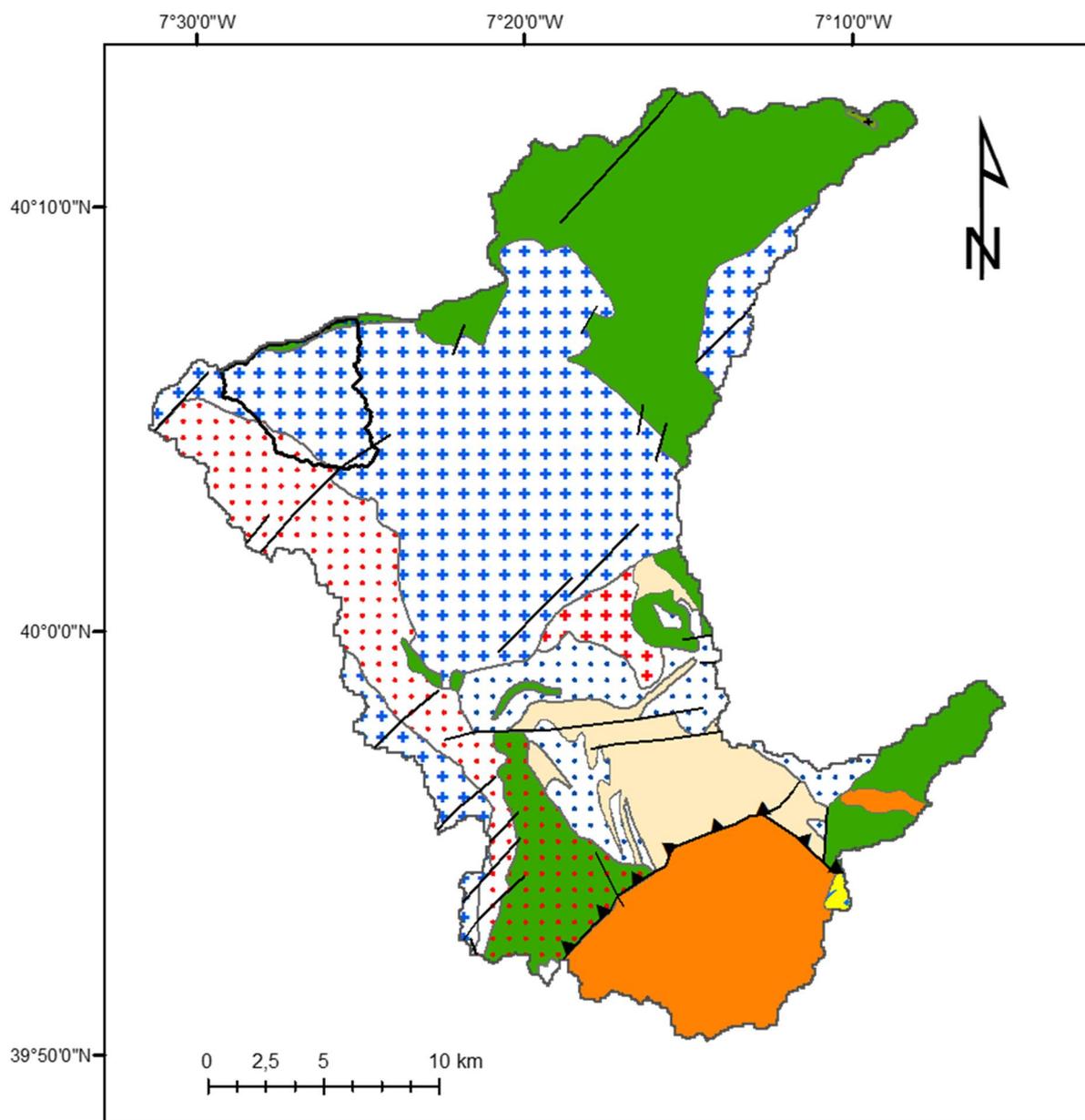


Figura 13- Geologia da bacia hidrográfica da Ponte da Munheca, criada com o software ArcGis 10.3.1, com base em dados do geoPortal do LNEG (2010).

A **Formação de Alameda** é constituída na sua generalidade por um predomínio de metagrauvaques, normalmente amalgamadas e com espessura de algumas dezenas de metros, em relação aos estratos de metassilitos e metapelitos. Esta formação é litologicamente falando semelhantes ao membro superior da Formação de Malpica do Tejo (Romão & Ribeiro, 1992). Esta formação corresponde a passagem gradual de bancadas de metagrauvaques a um conjunto de estratos filíticos. Nesta formação assim como na formação do Rosmaninhal existe material detrítico com origem em áreas orogénicas recicladas, de natureza sedimentar quartzosa (Romão & Ribeiro (1992), citado em Machadinho, 2014).

O **Batólito Granítico da Beira** na área em estudo classifica-se segundo a Schermerhorn (1956) e Oen (1958;1970), tendo como base critérios tectono-metamórficos, sendo designados como granitos mais antigos (*Older*) e granitos mais recentes (*Younger*). Segundo estes autores, os granitos *Younger*, são complexos intrusivos zonados, alóctones, epizonais, que apresentam relações discordantes com os granitos mais antigos (*Older*) e com estruturas regionais (citado em Azevedo & Aguado, 2013)

Quando comparada esta classificação com o de Capdevila & Floor (1970) e Capdevila *et al.*, (1973), verificou-se que o grupo dos granitos *Older* inclui a série dos granitos de duas micas e alguns granitoides da série calco-alcalina, designados usualmente por granodioritos e granitos biotíticos precoces. Enquanto o grupo dos granitos *Younger* é composto essencialmente por granodioritos e granitos biotíticos, tardi-pós-cinemáticos, da série calco-alcalina (Azevedo & Aguado, 2013)

Ferreira *et al.*, (1987) datou os granitos pelo método U-Pb e a idade relativa da formação dos granitos *Older* de 320 - 310 Milhões de anos (Ma). Foram ainda descritas as fácies mais comuns dos granitoides Sin-D₃ (*Older*) sendo elas:

- Leucogranitos e granitos de duas micas, com deformação variável. A fácies dominante deste complexo intrusivo apresenta textura granular de grão médio e uma associação mineralógica composta por quartzo (27-35%), plagioclase (An₇₋₄) (22-35%), feldspato potássico perítico (15-30%), moscovite (6-12%) e biotite (2-8%). As fases acessórias mais comuns são silimanite, apatite, zircão, monazite e ilmenite (Azevedo & Aguado, 2013).
- Granodioritos e granitos biotíticos, com deformação variável. Na sua composição mineralógica apresentam quartzo (20-30%), plagioclase (An₃₄₋₁₈) (30-35%), feldspato potássico (~ 20%), biotite (> 10%). Os minerais acessórios incluem moscovite, apatite, zircão, monazite e opacos. As suas texturas variam de granulares de grão fino-médio a porfiroides. A moscovite, quando presente, tem carácter tardio (Azevedo & Aguado, 2013);

Ferreira *et al.*, (1987) datou pelo mesmo método os granitos *Younger* com uma idade 310 a 290 Ma. Foram ainda descritas as fácies mais comuns dos granitoides tardi-pós-D₃ (*Younger*), sendo elas:

- Granitos biotíticos, biotítico-moscovíticos e de duas micas por vezes porfiroide. Petrograficamente, o granito é constituído por megacristais de

feldspato potássico (microclina perfitica) com mais de 8 cm de comprimento, dispersos numa matriz de grão médio a grosseiro, formada por quartzo, plagioclase (An₁₅₋₃₂), feldspato potássico (essencialmente microclina perfitica) e biotite. Os minerais acessórios incluem apatite, zircão, monazite, ilmenite e xenotime (raro). Os granitoides biotítico-moscovíticos contêm quartzo (26-32%), feldspato potássico (25-35%), plagioclase (An₁₋₂₈) (25-33%), biotite (4-6%) e moscovite (2-5%), como constituintes essenciais (Azevedo & Aguado, 2013);

- Granitos essencialmente biotíticos, frequentemente porfiroides. Distinguem-se da fácies porfiroides biotíticas anteriormente descritas, pela presença de moscovite como fase modalmente importante e, nos casos em que exibem caráter porfiroide, pela menor dimensão dos megacristais de feldspato potássico. São, em geral, desprovidos de encraves, embora se encontrem, localmente, nódulos biotíticos e pequenos encraves de origem ígnea e/ou metassedimentar (Azevedo & Aguado, 2013);
- Gabros, dioritos, monzodioritos quartzíticos e granodioritos. Os gabronoritos têm textura granular hipidiomórfica de grão médio e contêm plagioclase (An₅₀₋₆₉), clinopiroxena (augite), ortopiroxena, hornblenda, biotite, quartzo intersticial, apatite, magnetite, ilmenite e zircão. Como consequência da alteração hidrotermal, apresentam ainda sericite, talco, clorite, calcite e anfíbola uralítica. Nos quartzodioritos, quartzomonzodioritos e granodioritos, a plagioclase varia entre andesina e oligoclase (An₁₅₋₄₆) e as fases máficas dominantes são a anfíbola (hornblenda ferromagnésiana a actinolite) e a biotite magnésiana. As proporções de quartzo e de feldspato alcalino tendem a aumentar para os termos mais evoluídos da sequência (Azevedo & Aguado, 2013).

Dos granitos aflorantes na área em estudo, sabe-se que os mais recentes (*Younger*) são os moscovítico-biotítico e os monzoníticos porfiroides, ocupando estes a maior parte da área. Os granitos antigos (*Older*) estão representados por quartzodioritos e granodioritos biotíticos, granitos e granodioritos e por granitos granodioritos porfiroides.

Os granitos nesta região estão geralmente afetados por extensas e profundas falhas, originadas durante o ciclo Varisco e reativadas durante a orogenia Alpina, que possibilitam o estabelecimento de circuitos hidráulicos para a água de origem meteórica (Morais, 2012).

A **Formação de Cabeço do Infante**, datada do paleogénico, é definida por Cunha como sendo a unidade basal cenozoica, areno-conglomerática (Cunha, 1987a; 1987b; 1992a; 1996, citado em Pais *et al.*, 2013). Esta formação assenta em discordância angular com o soco metassedimentar e/ou com granito, possui composição feldspática a qual se associam um importante volume de fragmentos líticos. Os sedimentos quando mal calibrados têm matriz lutítica esmectítica. Nos conglomerados, os clastos são de quartzito, quartzo leitoso, filito, feldspatos e por vezes granito (Pais *et al.*, 2013).

Predominam os arenitos grosseiros e conglomerados com aspeto maciço ou com estruturas de tração. Estas têm cor verde acinzentada ou esbranquiçada, sendo possível encontrar alguns níveis com tons violáceos ou rubefação (vermelhão). Nesta formação é típica a ocorrência de cimentação siliciosa, com uma espessura variável, que afeta sobretudo o teto da formação (Pais *et al.*, 2013)

As camadas dolomíticas podem atingir 45 m de espessura, constituindo calcretos ricos em paligorskite (Cunha & Reis, 1989, citado em Pais *et al.*, 2013). Outra característica é a frequente ocorrência de óxi-hidróxidos de ferro e manganês em carapaças ou formações dendríticas (Almeida *et al.*, 2000a).

Existe uma fraca dispersão nas direções de paleocorrentes, indicando leques aluvionares coalescentes com baixo gradiente, sendo que os paleorrelevos de rochas ordovícicas, alinhados NW-SE, acabaram por condicionar a direção e sentido da drenagem. As fácies são essencialmente areno-conglomeráticas, sendo que no membro inferior foram depositadas por correntes efémeras predominando fluxos não confinados, contudo no membro superior predominam as geometrias que indicam fluxos canalizados, tendo ainda sido o controlo tectónico da sedimentação efetuado por abatimentos definidos pelas falhas NE-SW (Pais *et al.*, 2013)

A **Formação de Silveirinha de Figos** assenta, por desconformidade, na formação de Cabeço do Infante ou mais raramente sobre metassedimentos. Na região de Sarzedas, o limite superior corresponde a descontinuidade sedimentar situada, a aproximadamente uma cota de 400 m (Pais *et al.*, 2013)

Esta unidade arenosa de Silveirinha de Figos é exclusivamente arenosa e silto-argilosa e é composta por arcoses, subarcoses e quartzarenitos. A área de maior importância corresponde a zona da lomba de Sarzedas, sendo que também existem outras áreas no setor SW da região, mas com menor extensão e espessura. A espessura máxima desta formação ronda os 60 m (Almeida *et al.*, 2000a).

Segundo Cunha (1992a; 1996, citado em Pais *et al.*, 2013), a Formação de Silveirinha de Figos teve origem no Miocénico inferior a médio, período no qual se instalou um sistema fluvial entrançado que drenava de NE para SW, sendo que deste se depositaram areias alaranjadas e lutitos verdes com poucos fósseis.

Os sedimentos são friáveis e por norma mal calibrados, predominando calhaus de quartzito e quartzófilo, com um diâmetro máximo de 5 cm, nesta formação o conteúdo de feldspatos é também elevado. Nesta formação é ainda comum encontrar figuras de canal com uma centena de metros de largura (Pais *et al.*, 2013). Estes sedimentos resultaram de um sistema deposicional arenoso e entrançado, que drenava a planície fluvial da Bacia do Baixo Tejo de NE para SW, tendo como possível área-mãe os batólitos de Castelo Branco-Idanha, de Monsanto, assim como os metassedimentos entre eles (Pais *et al.*, 2013).

3.2.2- Tectónica da Bacia da Ponte da Munheca

Devido a importância que a tectónica tem na circulação de águas fez-se uma carta tectónica da Bacia da Ponte da Munheca (Fig.14). Esta carta elaborou-se tendo como base falhas cartografadas na carta geológica 1:500000 (Carvalho *et al.*, 1992) e com o auxílio do MDT (Fig.11) a partir das quais se traçaram alguns alinhamentos estruturais.

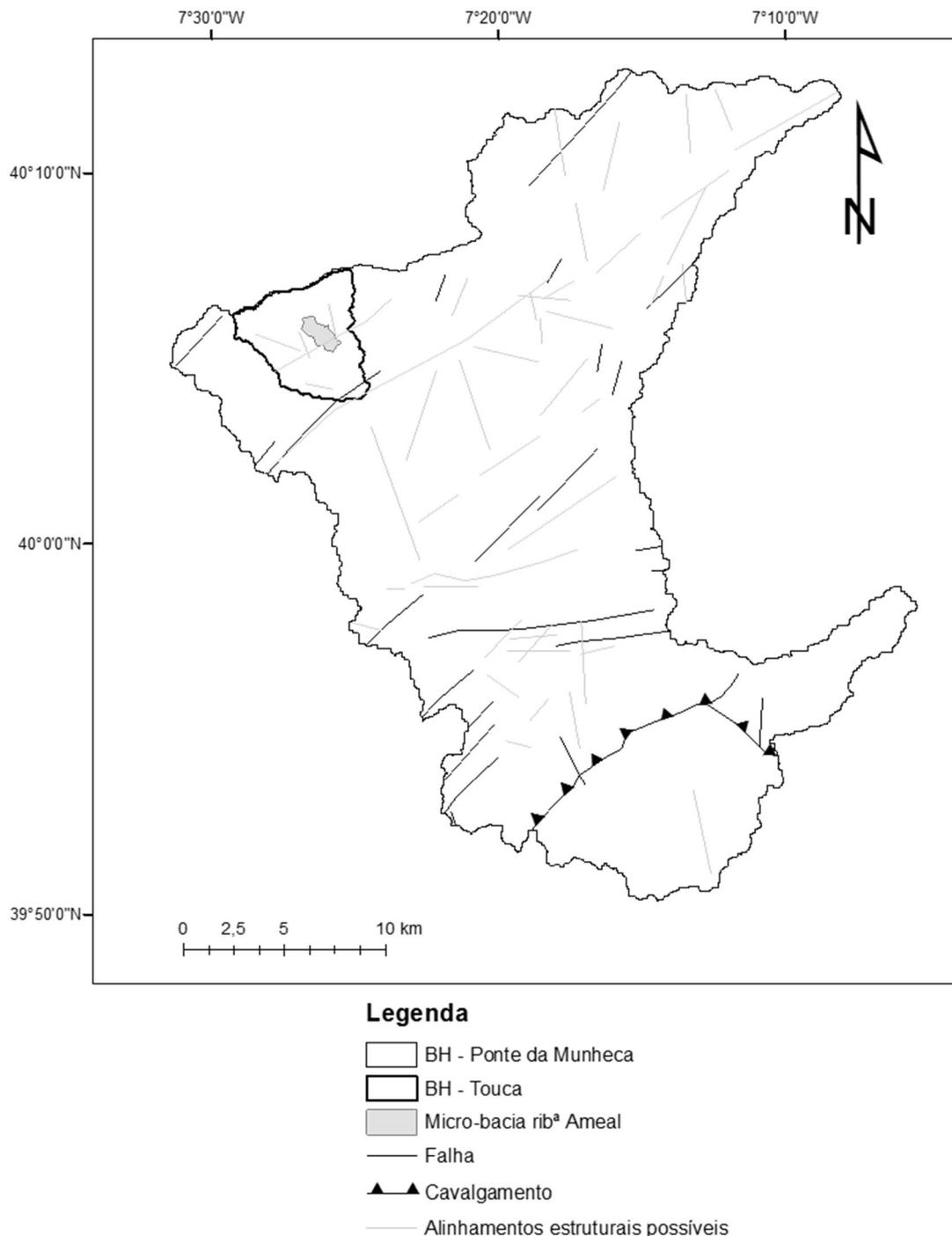


Figura 14- Carta Tectónica da Bacia da Ponte da Munheca, com falhas cartografadas na carta geológica 1:500000 e alinhamentos estruturais inferidos a partir do MDT, criado no software ArcGis 10.3.1.

Analisando a carta estrutural em cima referida, pode dizer-se que existem inúmeros alinhamentos com direções E-W, SW-NE, SSE-NNW e menos comuns SE-NW.

3.2.3- Levantamento Geológico na mb RA

Na área da Bacia da Touca, onde se insere o domínio em estudo - **mb RA** - as rochas aflorantes são: litótipos da Formação de Alameda, granitos moscovítico-biotíticos e granitos monzoníticos porfíroides, sendo estes últimos os mais representados (Fig.13).

Na micro-bacia estudada - **mb RA** - o granito aflorante é do tipo monzonítico porfíroide. Este granito é constituído fundamentalmente por feldspato potássico, plagioclase, quartzo e biotite, sendo que tem textura porfíroide com destaque para os megacristais de feldspato. Apresenta-se em algumas zonas bastante fraturado e alterado físico-quimicamente, alteração essa que lhe confere uma menor consolidação (Fig.15-a).

Na área em estudo alguns afloramentos graníticos expressam elevada fraturação (Fig.15-a), enquanto outros se apresentam relativamente são e pouco fraturados (Fig.15-b).

O granito devido à sua mineralogia é um granito biotítico porfíroide. As amostras de mão (Fig.15-e,15-f) apresentam uma mineralogia bastante homogénea, constituída por feldspatos e plagioclase entre os 45-55%, quartzo entre 35-40% e biotite entre 10-15%. O granito apresenta uma elevada quantidade de fenocristais centimétricos de feldspato potássico, que em alguns casos estão orientados (Fig.15-d).

Nas amostras de mão é possível ver o zonamento interno de algumas plagioclases e feldspatos potássico. A biotite ocorre com elevada abundância e é a única mica observável a olho nu, na figura 15-f, a biotite apresenta-se alterada o que origina a cor mais amarelada do granito devido aos óxidos de ferro que lhe estão associados.

Existe ainda nestas amostras algumas microfraturas preenchidas com óxidos de ferro. Alguma alteração, nomeadamente associada às fraturas maiores, poderá ter origem na circulação de fluidos hidrotermais.

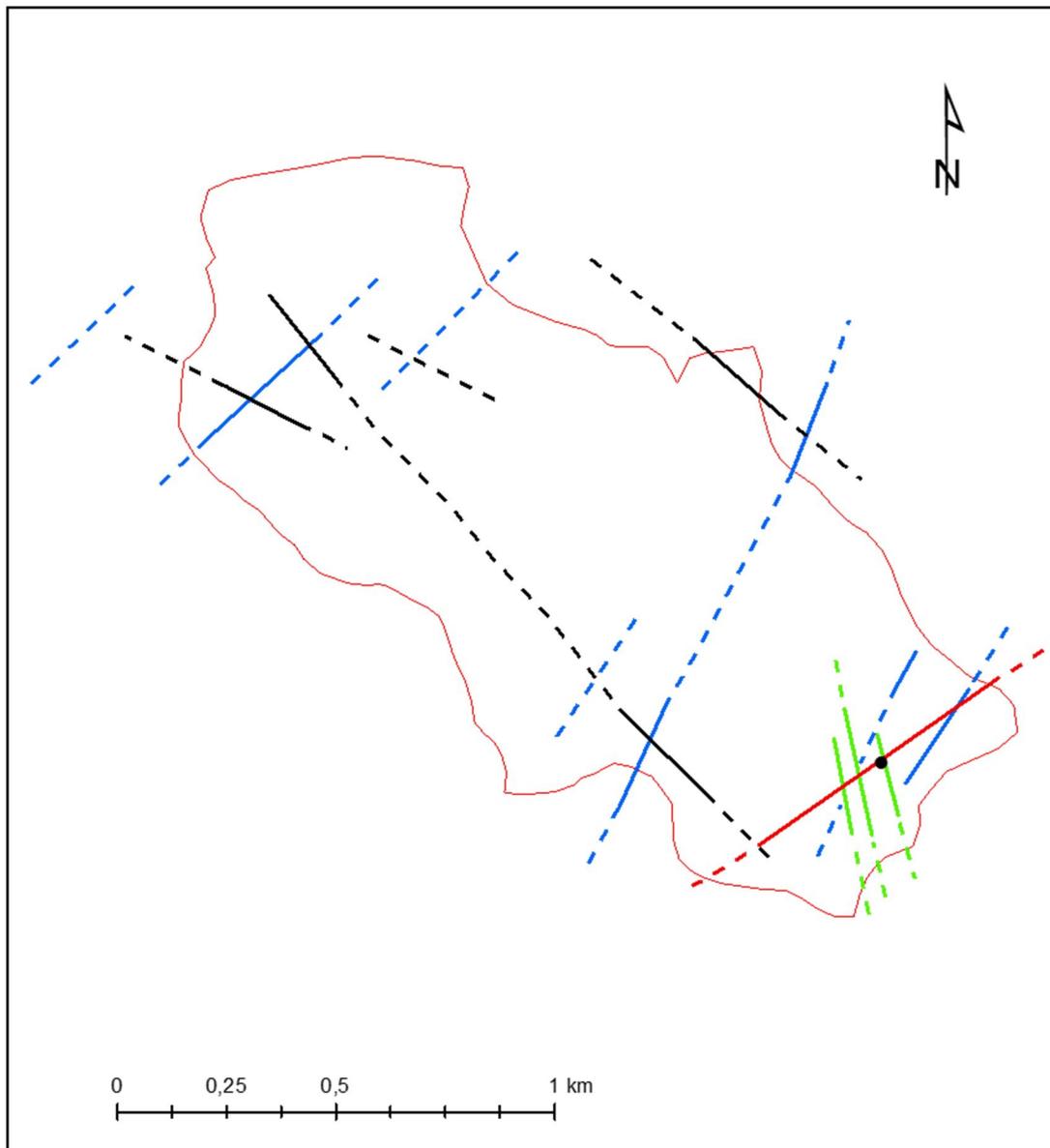


Figura 15- Aspectos do granito monzonítico porfiróide na zona em estudo: a) afloramento granítico com elevado grau de alteração e inúmeras fraturas, b) afloramento granítico relativamente são, c) afloramento granítico com fraturação bem visível, d) afloramento granítico com elevada densidade de fenocristais, e) amostra de mão de um granito são e f) amostra de mão de um granito mais alterado.

As rochas graníticas locais apresentam frequentemente um número considerável de fraturas: diaclases de extensão variada e falhas.

Nos trabalhos de campo foram identificadas e medidas as atitudes das diversas famílias de fraturas expressas nos afloramentos graníticos.

Na Figura 16 e tendo como base as medições de campo, a análise de imagens de satélite ASTGTM2_N39W008 e os elementos apresentados por ACavaco (2000), apresenta-se um mapa tectónico para a zona estudada (mb RA).



Legenda

Micro-bacia ribª do Ameal

• Termas da Touca

Fracturação

— N 40 - 50° W

— N 10 - 20° W

— N 60 - 70° E

— N 30 - 40° E

Figura 16- Mapa tectónico da zona estudada -micro-bacia da ribª do Ameal, (linhas preenchidas correspondem a fraturação medida e as linhas a tracejado correspondem a fraturas prováveis). A fraturação a verde foi extraída de ACavaco (2000).

A análise do mapa tectónico acima referido (Fig.16) permitiu o agrupar e hierarquizar a fraturação principal em 2 famílias:

- Fraturação principal: N60-70°E, subvertical, com carácter regional;
- Fraturação local: N40-50°W, N10-20°W e N30-40°E.

Segundo Morais (2012), a fraturação local estará associada a um sistema de falhas regionais, geralmente muito profundas e com uma extensão relativamente grande, rejogadas num episódio orogénico mais recentemente. Contudo, verifica-se que são fraturas de menor expressão, tendencialmente transversais às falhas principais (como se pode ver na carta estrutural), que, funcionando como barreiras naturais, promovem a ascensão até à superfície da água mineroterma a partir de reservatório e circuitos profundos.

De referir que este sistema local de fraturação é relativamente semelhante à que existe na zona das Minas da Panasqueira, sendo que naquela região as principais falhas pertencem aos sistemas N-S e ao sistema NE-SW a ENE-WSW (Pinto, 2014).

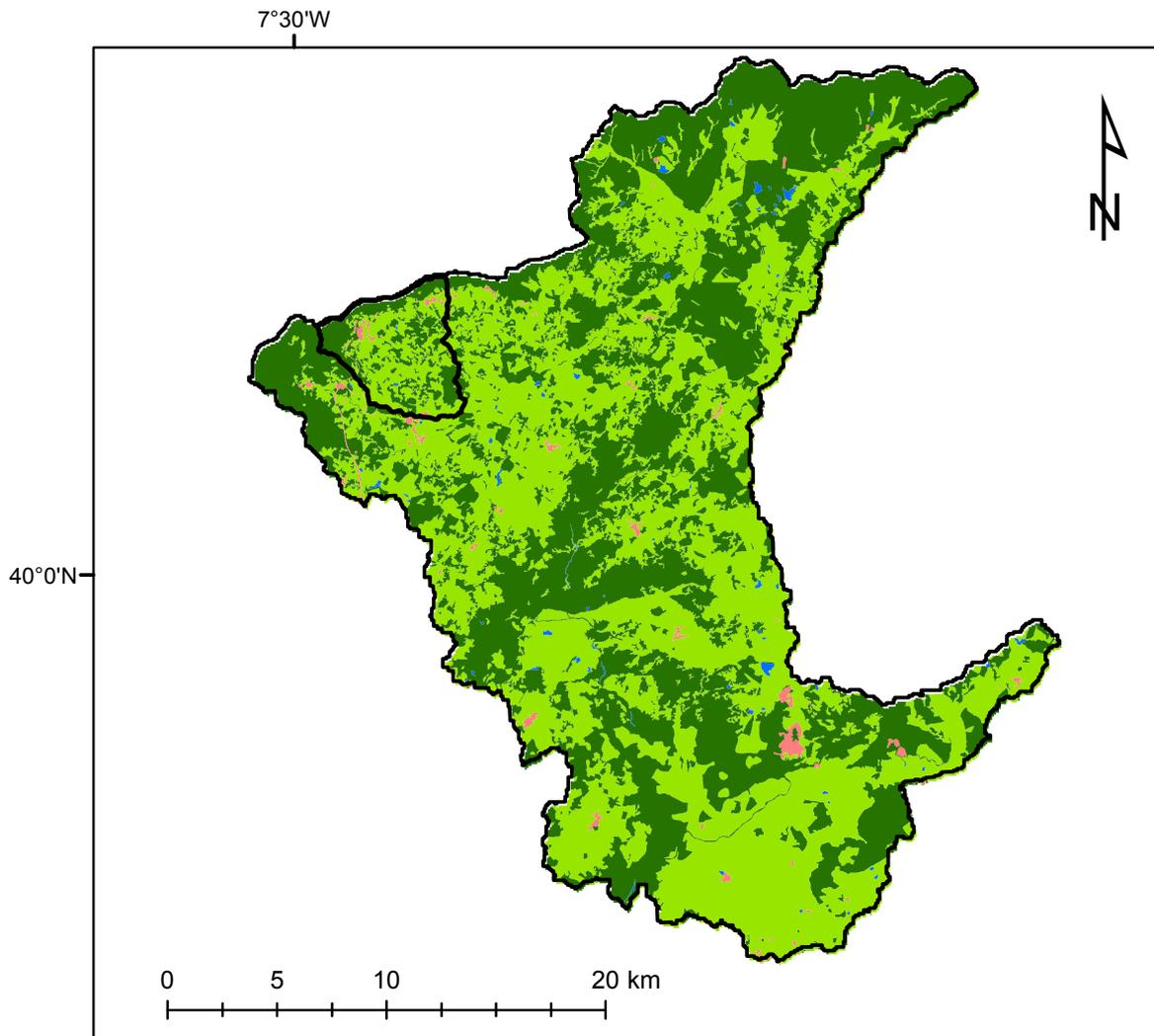
Em determinados planos de fraturas locais verificou-se a ocorrência de estriamentos (Fig.15-a e 15-c). Foi possível observar ainda macroscopicamente a ocorrência de microfaturas paralelas a algumas famílias de fraturas com maior expressão.

3.3- Uso e ocupação do solo

O estudo do uso e a ocupação do solo é bastante importante em estudos de natureza hidrogeológica, uma vez que permite a identificação de possíveis focos de contaminação e consequentes alterações na qualidade da água subterrânea.

Para a região estudada fizeram-se dois mapas com o uso e ocupação do solo, tendo como base os elementos constantes das Cartas de uso e ocupação do solo (Instituto Geográfico Português, 2010). Assim, foram elaborados dois mapas: (1), um para a bacia hidrográfica da Ponte da Munheca e (2) para a bacia da Touca.

Na carta da bacia da Ponte da Munheca (Fig.17) foram utilizadas apenas as nomenclaturas de nível 1, pois a área da bacia é relativamente grande e não se justificava apresentar um mapa com grande detalhe do uso e ocupação do solo.



Legenda

- BH - Touca
- BH - Ponte da Munheca

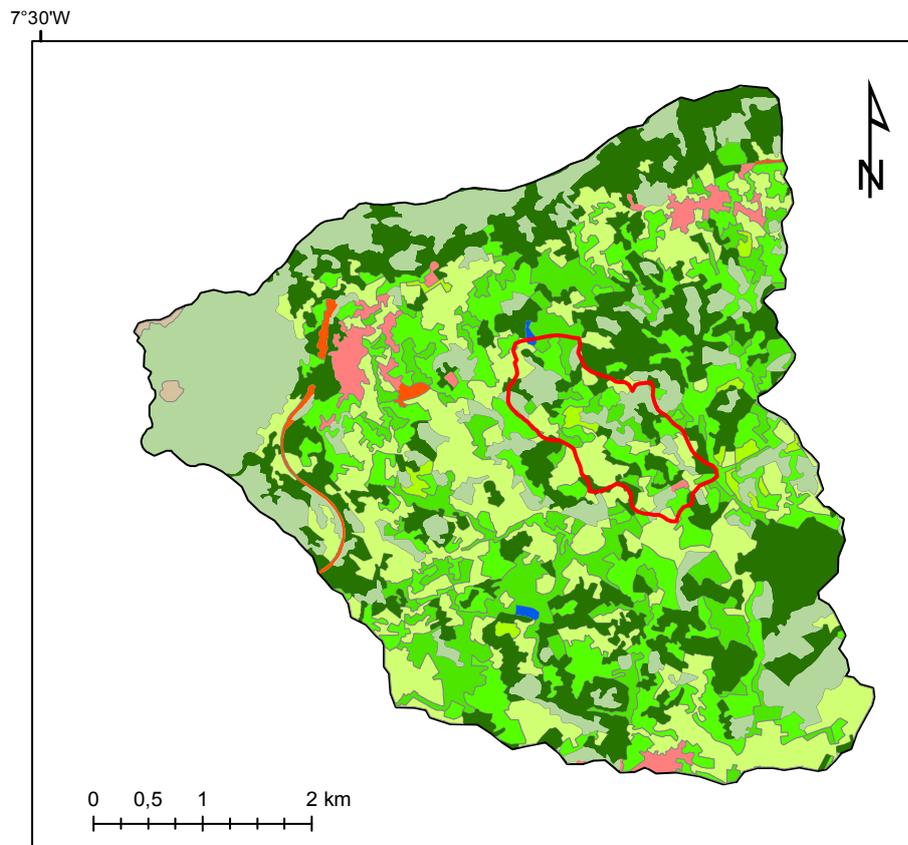
Cos 2007 N1

- 1- Territórios artificializados
- 2- Áreas agrícolas e agro-florestais
- 3- Florestas e meios naturais e semi-naturais
- 5- Corpos de água

Figura 17- Carta do uso e ocupação do solo caracterizada pelos níveis 1, da bacia da Ponte da Munheca. Dados de COS 2007 (IGP, 2010).

Nesta carta (Fig.17) é possível observar que grande parte da superfície é ocupada por florestas e áreas agrícolas, sendo que existem, mas com muito menor importância zonas artificializadas (construções humanas, como estradas e edifícios) e ainda alguns corpos de água.

Na carta da bacia da Touca (Fig.18) foram utilizados os níveis do tipo 2, devido ao facto da área ser mais reduzida e deste modo ser possível existir maior detalhe.



Legenda

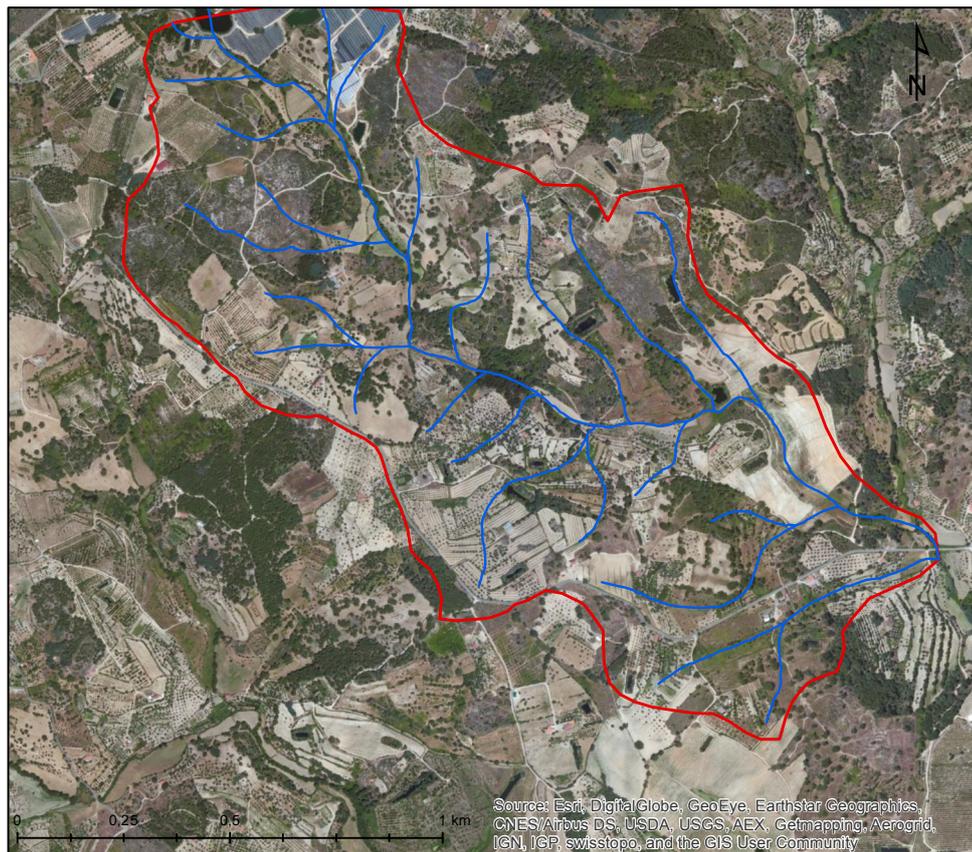
- Micro-bacia rib^a Ameal
- BH - Touca
- COS 2007 N2**
- 1.1 - Tecido urbano
- 1.2 - Indústria, comércio e transportes
- 2.1 - Culturas temporárias
- 2.2 - Culturas permanentes
- 2.3 - Pastagens permanentes
- 2.4 - Áreas agrícolas heterogéneas
- 3.1 - Florestas
- 3.2 - Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea
- 3.3 - Zonas descobertas e com pouca vegetação
- 5.1 - Águas interiores

Figura 18- Carta do uso e ocupação do solo caracterizada pelos níveis 2, da bacia da Touca. Dados de COS 2007 (IGP, 2010)

Nesta carta é possível ver que, nas zonas mais elevadas, a ocupação do solo é feita por florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea e por zonas descobertas e com pouca vegetação. Nas zonas mais aplanadas existe uma enorme extensão de área agrícola heterogénea de culturas temporárias e culturas permanentes.

A área urbanizada divide-se em tecido urbano, industrial, comercial e de transportes. Existem três núcleos principais de tecido urbano que representam três aldeias, nomeadamente Alpedrinha a NW, Vale de Prazeres a NE e Póvoa de Atalaia a S. Os domínios afetos à autoestrada A23 têm importante expressão no setor NW. É ainda possível observar duas massas de água superficiais de alguma dimensão denominadas por águas interiores.

Foi ainda delimitada a mb RA numa imagem de satélite da zona para comparar as imagens (Fig.19).



Legenda

-  Linhas de água
-  Micro-bacia rib^a Ameal

Figura 19- Mapa da zona estudada com a micro-bacia hidrográfica da ribeira do Ameal (mb RA) e representação da rede de drenagem assim como do uso e ocupação dos solos (sobre imagem da ESRI).

Especificamente no domínio estudado - mb RA -, a grande maioria do solo está ocupado por florestas (florestas e florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea) assim como por terrenos agrícolas (culturas temporárias, permanentes, assim como pastagens permanentes e áreas agrícolas heterogéneas). De salientar que na figuras 18 e 19 as zonas urbanas não têm relevância, na mb RA, no uso e ocupação do solo.

4- Hidrogeologia

No presente capítulo apresentam-se dados de (1) hidrogeologia física, (2) hidroquímica e (3) modelo conceptual da área estudada.

4.1- Hidrogeologia física - Fundamentos teóricos

As características geológicas dos terrenos que preenchem uma bacia hidrográfica constituem o principal fator condicionante da circulação e armazenamento hídricos subterrâneos naquele espaço físico, ou seja, a Geologia é o fator mais importante na consideração de unidades hidrogeológicas e na definição de formações aquíferas, boas ou pobres, aquíferos, aquíferos, (Almeida *et al.*, 2000a, citado em Correia, 2014).

A área em estudo – micro-bacia de ribeira do Ameal - mb RA – enquadra-se na grande unidade hidrogeológica portuguesa designada por Maciço Antigo. O tipo de rochas mais abundante nesta Unidade são as rochas ígneas e metassedimentares, sendo que estas são ainda designadas como rochas cristalinas ou duras, por rochas fraturadas ou fissuradas com diversos graus de alteração (Almeida *et al.*, 2000a).

A circulação hídrica neste tipo de rochas é maioritariamente superficial, pois opera-se na camada de alteração e na rede de fraturas resultante da descompressão dos maciços aquando do seu arrefecimento. Nestas condições, as superfícies freáticas acompanham, quase “fielmente” a topografia superficial e o sentido do escoamento faz-se na maioria da bacia perpendicularmente às linhas de água, local onde ocorre maioritariamente a descarga aquífera. Os níveis freáticos são geralmente muito sensíveis às variações na precipitação atmosférica, regional ou local.

A existência de acidentes tectónicos de maior expressão, nomeadamente de fraturas profundas, dá origem a uma circulação mais profunda, sendo que muitas vezes acaba por dar origem a sistemas hidrotermais (Almeida *et al.*, 2000a).

4.1.1- Classificação hidrogeológica

Na área em estudo é possível agrupar as formações geológicas consoante a sua capacidade ou não de retenção e cedência de água, isto é, classifica-las hidrogeologicamente.

Como referido no Capítulo 3, numa significativa parte da superfície da **mb RA**, o granito aflorante apresenta-se bastante alterado, quer química, quer fisicamente. Esta alteração promove uma capa designada comumente por camada de saibro granítico. Esta camada de alteração é em alguns sítios pouco espessa (cerca de 1 a 2 m), mas há locais onde esta ronda os 20 m, nomeadamente nas imediações das Termas da Touca (ACavaco, 1999).

A decomposição físico-química dos minerais e a desagregação textural tendem a transformar o granito em material mais arenoso (saibrente) o que faz com que haja uma maior percentagem de vazios intergranulares e um considerável aumento da porosidade. Segundo Stewart (1964, citado em Fetter, 2001), a decomposição química e a desintegração física pode aumentar a porosidade de uma rocha em cerca de 30 a 60%.

Na camada superficial do granito alterado e fraturado ocorre frequentemente um aquífero não-confinado com um comportamento típico de um meio poroso. Este aquífero usualmente apresenta grande produtividade e a água subterrânea é captada essencialmente através de pequenas depressões (charcos) e poços.

Com o avanço em profundidade o maciço granítico estará progressivamente menos alterado. A fraturação será menos densa, mas a existente incluirá fraturas mais extensas e profundas. Assim, as massas de água estarão implantadas em aquíferos do tipo fissural e a porosidade existente é mais baixa.

Se conjugarmos estas características geológico-estruturais, é possível agrupar o meio granítico, segundo Streltsova (1976; citado em Fialho *et al.*, 1998), em três tipos hidrogeológicos distintos (Fig.20):

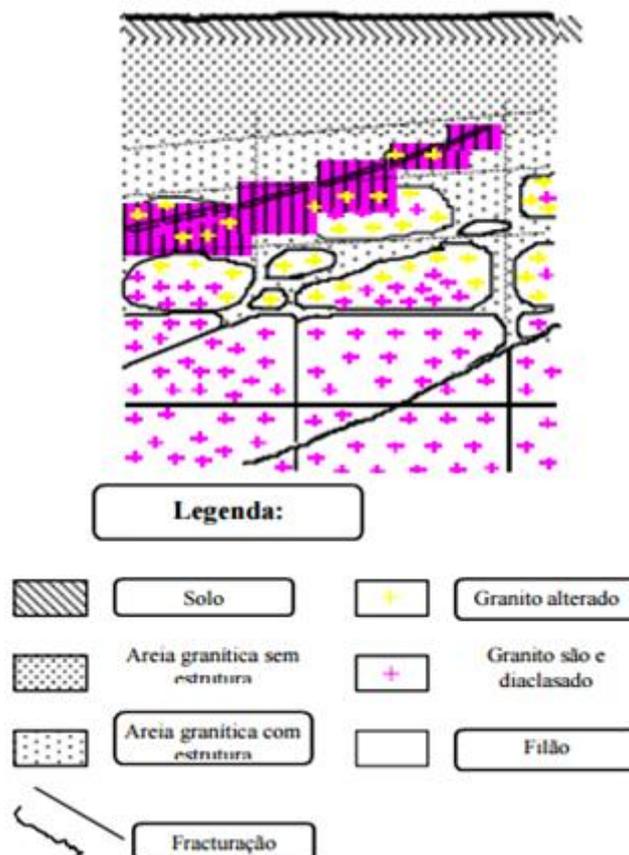


Figura 20- Perfil típico de rochas fraturadas em clima temperado (Godard, 1977).

- Os níveis (capas) superiores, com elevado grau de alteração e desagregação, apresentam comportamento típico de meio poroso;
- Os níveis intermédios com alteração ligeira e com fraturação densa correspondem a um meio hidrogeológico com porosidade dupla, isto é, do tipo poroso-fissurado;
- Os domínios seguintes, onde o granito é são e, em certos setores, fissurado correspondem a um meio puramente fraturado.

De acordo com Barenblatt *et al.*, (1960; citado em Fialho *et al.*, 1998) (Fig.20) entende-se como meio de porosidade dupla aquele em que existem dois sistemas entrosados, um de blocos porosos (granito relativamente alterado), com permeabilidade baixa, mas com elevada capacidade de armazenamento, e outro de fraturas, com permeabilidade mais elevada, mas com escassa capacidade de armazenamento. Considera-se então que a porosidade total resulta da existência de dois tipos distintos: a porosidade correspondente aos blocos e a correspondente às fraturas.

No domínio em estudo - mb RA - ocorrem seguramente estes tipos hidrogeológicos do meio subterrâneo. Contudo, a sua organização espacial (profundidade e extensão lateral) é variada.

4.1.2- Propriedades das unidades aquíferas

Os parâmetros geológico-estruturais e hidráulicos, como por exemplo, a porosidade, a condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento, condicionam e caracterizam o comportamento de fluidos em repouso e em movimento no meio subterrâneo.

4.1.2.1- Porosidade (n)

A porosidade mede a capacidade da rocha de armazenar fluidos. Esta propriedade é definida como a relação entre o volume de espaços vazios (V_V) de uma rocha e o volume total (V_T) da mesma, expressa em % (Roque & Missagia, 2012) [1].

$$n = \frac{V_V}{V_T} \quad [1]$$

A porosidade pode ser ainda subdividida, em porosidade primária e secundária.

A porosidade primária é a porosidade que uma rocha apresenta no momento da sua formação, ou no caso das rochas sedimentares, depois de sofrer litificação ou diagénese (Almeida *et al.*, 2000b).

A porosidade secundária é a que resulta de processos posteriores à formação da rocha, como por exemplo em consequência de processos tectónicos, diaclasamento, ou pela ação dissolvente das águas (Almeida *et al.*, 2000b).

Segundo Freeze & Cherry (1979) a porosidade primária de uma rocha cristalina pode variar de 0 a 5%, enquanto a porosidade secundária desse mesmo tipo de rocha fraturada varia entre 0 e 10%.

A existência de fraturas pode aumentar a porosidade de rochas cristalinas em 2 a 5% (Davis 1969; Brace, Paulding & Scholz 1966; citados em Fetter, 2001).

Em Hidrogeologia, utiliza-se a porosidade efetiva (n_e) que corresponde a razão entre o volume de poros conectados, que contém o volume de fluidos recuperáveis, e o volume total da rocha (Roque & Missagia, 2012).

4.1.2.2- Condutividade Hidráulica (K)

A condutividade hidráulica (K) é o parâmetro que mede a capacidade que um meio tem em permitir a passagem de um fluido (entenda-se neste caso, a água), através dos seus poros, por unidade de área, em unidades de comprimento/tempo (L/T), de acordo com a equação (Darcy, 1856; citado em Fetter, 2001) [2]:

$$K = \frac{-Q}{A (dh/dl)} \quad [2]$$

Onde Q representa o caudal de descarga, em unidades de volume/tempo (L^3/T), como por exemplo m^3/d ; A é a área da secção transversal ao fluxo, com unidades de área (L^2), dm^2 ou m^2 ; dh/dl , ou gradiente hidráulico, é a variação na altura piezométrica (ou na carga hidráulica), por comprimento percorrido segundo a direção do fluxo, em unidades comprimento/comprimento (L/L) ou adimensional, que, como é sempre negativo no sentido do fluxo, é compensado pelo sinal negativo da equação 2.

Segundo Hiscock (2005), a condutividade hidráulica de uma fratura (K_f) é calculada de acordo com a equação [3]:

$$K_f = \frac{\rho g (2b)^2}{12 \mu} \quad [3]$$

Onde ρ corresponde a densidade do fluido, μ corresponde a viscosidade do fluido, b corresponde a espessura da fractura e g à aceleração gravitacional.

A condutividade hidráulica depende tanto das características do meio geológico, como a porosidade, o tamanho dos poros, a distribuição, forma e arranjo das partículas; como das propriedades do fluido, sendo as principais, a viscosidade e o peso específico. Assim sendo, diferentes estados de alteração ou fraturação em granitos originam valores distintos da sua condutividade hidráulica (Tab.4).

Tabela 4- Valores da condutividade hidráulica para rochas ígneas e metamórficas (meios fraturados) (adaptado de Domenico e Schwartz, 1990).

Litologia	Condutividade Hidráulica (cm/s)
Rochas ígneas e metamórficas não alteradas	3×10^{-12} a 2×10^{-8}
Rochas ígneas e metamórficas fraturadas	8×10^{-7} a 3×10^{-2}
Granito alterado	$3,3 \times 10^{-4}$ a $5,2 \times 10^{-3}$

4.1.2.3- Transmissividade (T)

A transmissividade (T) pode ser descrita como a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por uma unidade aquífera saturada com uma extensão unitária e sob um gradiente hidráulico unitário, como descrito na equação [4]. As unidades são dadas em área/tempo (L^2/T), geralmente m^2/d ou m^2/s .

$$T = K.b \quad [4]$$

em que K é a condutividade hidráulica, em m/s

b é a espessura do aquífero confinado ou a espessura saturada, no caso de aquíferos não confinados, em m.

4.1.2.4- Coeficiente de Armazenamento (S)

O coeficiente de armazenamento (S) pode ser descrito como sendo a razão entre o volume de água cedido por uma coluna de aquífero com secção unitária, aquando de uma descida do nível piezométrico, como expresso na equação [5].

$$S = b.S_s \quad [5]$$

Onde b é a espessura saturada, em m;

S_s é o armazenamento específico do aquífero (1/m); sendo que S_s se define pela expressão [4.4].

$$S_s = \rho_w.g (\alpha + \eta\beta) \quad [4.4]$$

Onde ρ_w é a massa volúmica do fluido, em kg/m^3 ;

g é a aceleração da gravidade, em m^2/s ;

η é a porosidade (volume de poros sobre volume total);

α é a compressibilidade do meio poroso

β é a compressibilidade do fluido (variação do volume por unidade de pressão) em m^2/N ou $m.s^2/kg$.

Segundo Hiscock (2005), o armazenamento de um aquífero freático é conhecido por cedência específica, sendo que este é aproximadamente equivalente à porosidade total de um solo ou rocha.

4.1.3- Caracterização hidrogeológica local

Para a caracterização da hidrogeologia local houve necessidade de fazer um reconhecimento e estudo dos pontos de água presentes na bacia estudada - mb RA (Fig.2). Do conjunto de pontos identificados, selecionaram-se alguns para medições *in situ* de parâmetros físico-químicos. Com os resultados obtidos e com elementos disponíveis na bibliografia consultada procedeu-se à caracterização da hidrodinâmica subterrânea e da hidrogeoquímica locais.

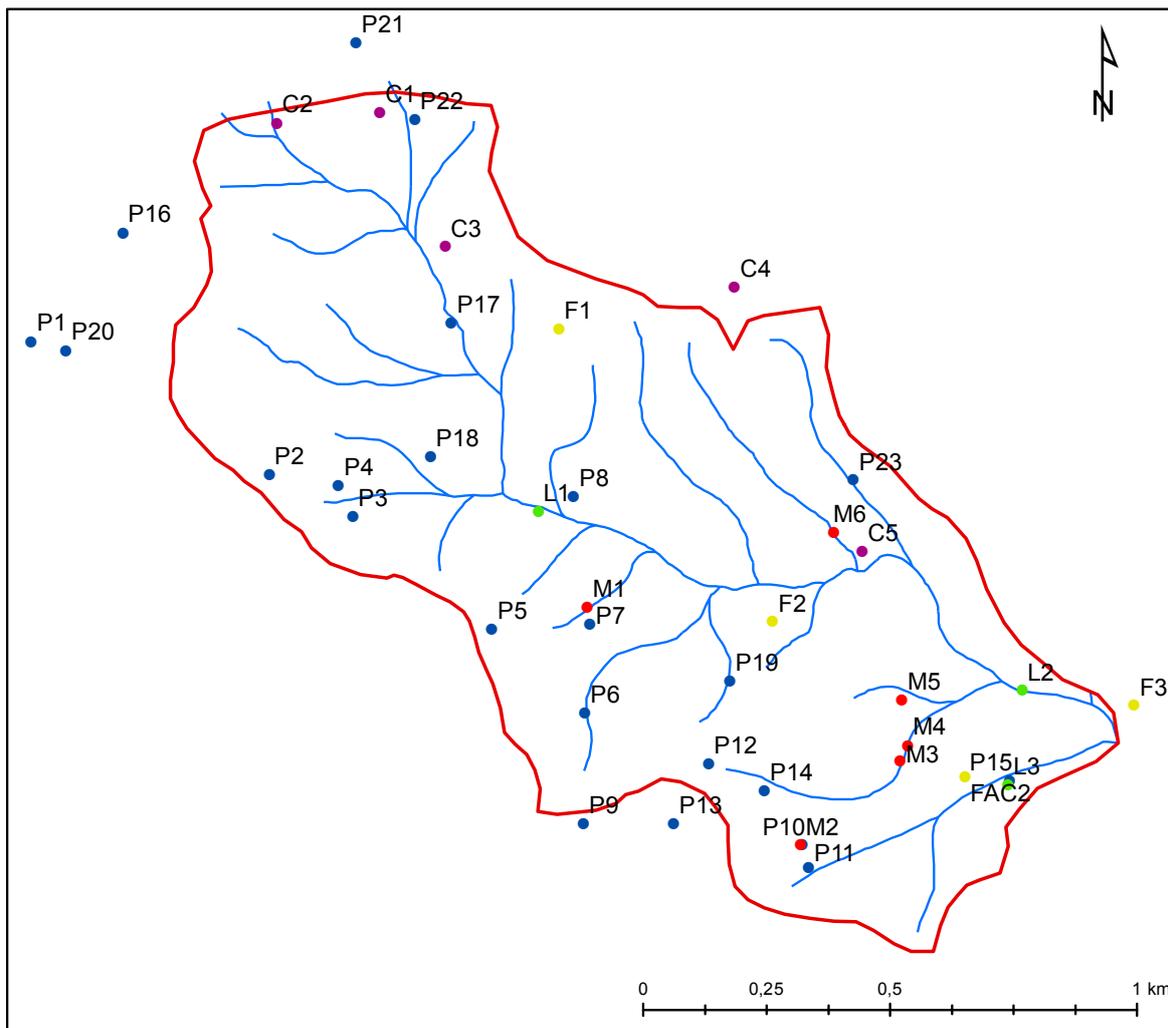
4.1.3.1- Pontos de água

Foram identificados 42 pontos de água, entre 23 poços; 5 charcos; 6 nascentes e “minas de água”; 5 furos e 3 locais em linhas de água na micro-bacia da ribeira do Ameal (Tab.5). Pretendeu efetuar-se uma amostragem sistemática de poços e minas de água, no entanto, poderá haver outros pontos de água que por serem inacessíveis não constam deste levantamento.

Nos pontos de água selecionados foram feitas medições físico-químicas *in situ*, obtiveram-se as coordenadas geográficas no sistema WGS84 com o GPS Garmin eTrex®; e efetuou-se, sempre que possível, a sua caracterização geral (por exemplo, diâmetro, profundidade total, profundidade da água, altura do muro no caso dos poços) de modo a obter o nível freático na bacia e estimar a espessura da capa de alteração do granito (Fig.21 e Tab.5).

Tabela 5- Enquadramento geográfico dos pontos de água reconhecidos no domínio estudado (mb RA).

Ponto de água	Longitude	Latitude	Cota na superfície (m) (a partir do Google Earth)
Poço 1	40°05,761'	007°27,224'	495
Poço 2	40°05,611'	007°26,892'	476
Poço 3	40°05,588'	007°26,768'	475
Poço 4	40°05,593'	007°26,792'	476
Poço 5	40°05,432'	007°26,580'	464
Poço 6	40°05,337'	007°26,450'	451
Poço 7	40°05,439'	007°26,435'	454
Poço 8	40°05,577'	007°26,457'	451
Poço 9	40°05,215'	007°26,455'	452
Poço 10	40°05,194'	007°26,133'	446
Poço 11	40°05,166'	007°26,130'	446
Poço 12	40°05,282'	007°26,270'	461
Poço 13	40°05,212'	007°26,315'	462
Poço 14	40°05,246'	007°26,192'	453
Poço 15	40°05,261'	007°25,844'	425
Poço 16	40°05,879'	007°27,091'	502
Poço 17	40°05,765'	007°26,632'	475
Poço 18	40°05,676'	007°26,670'	465
Poço 19	40°05,373'	007°26,237'	452
Poço 20	40°05,750'	007°27,175'	490
Poço 21	40°06,084'	007°26,754'	500
Poço 22	40°05,998'	007°26,672'	487
Poço 23	40°05,592'	007°26,056'	437
Charco 1	40°05,997'	007°26,869'	492
Charco 2	40°05,857'	007°26,632'	476
Charco 3	40°05,807'	007°26,221'	473
Charco 4	40°05,513'	007°26,046'	427
Charco 5	40°06,007'	007°26,722'	492
Mina 1	40°05,457'	007°26,439'	454
Mina 2	40°05,191'	007°26,141'	447
Mina 3	40°05,261'	007°25,991'	432
Mina 4	40°05,303'	007°25,986'	430
Mina 5	40°05,349'	007°25,993'	428
Mina 6	40°05,528'	007°26,090'	432
Ribeira 1	40°05,262'	007°26,495'	452
Ribeira 2	40°05,357'	007°25,833'	425
Ribeira 3	40°05,260'	007°25,823'	425
Furo 1	40°05,757'	007°26,464'	473
Furo 2	40°05,438'	007°26,175'	443
Furo 3	40°05,338'	007°25,662'	425
Furo AC1	40°05,270'	007°25,924'	426
Furo AC2	40°05,263'	007°25,905'	426



Legenda

- | | |
|---|--|
| Micro-bacia rib ^a Ameal | ● Poço |
| — Linhas de água | ● Charco |
| | ● Mina |
| | ● Linha de água |
| | ● Furo |

Figura 21- Localização dos pontos de água inventariados na bacia hidrográfica da ribeira do Ameal, criado no software ArcGis 10.3.1, a partir dos dados da tabela 5.

Analisando a figura é possível observar que existe uma maior densidade de pontos de água na zona sul da bacia estudada.

Após o reconhecimento geral, procedeu-se à seleção dos pontos de água para a medição *in situ* de algumas características físico-químicas, nomeadamente: temperatura, condutividade elétrica da água (CE), pH e Eh, nos meses de fevereiro e maio de 2015.

A grande maioria dos pontos de água inventariados (Fig.21) corresponde a poços. Estes, assim como os charcos e as minas de água, são utilizados para captar água no aquífero freático instalado na camada de alteração superficial dos granitos, utilizados sobretudo na agricultura, pecuária e raramente para consumo humano.



Figura 22- Alguns aspetos dos pontos de água identificados na área em estudo: a) Poço de alvenaria (P15) nas proximidades das Termas da Touca. b) Mina de água, provavelmente situada em caixa e falha. c) Charca ou charco (C3), com notória descida do nível freático. d) ribeira do Ameal em julho de 2015; e) Aspeto do furo F3.

Poços

No conjunto de poços identificados existem vários tipos de construção, nomeadamente em alvenaria, (tijolo tradicional (Fig.22-a) e tijolo de cimento), em manilhas de cimento e em blocos de granito. A média de profundidade dos poços é de 5,7 m, mas existem poços muito mais profundos, tendo o poço 3 (P3) cerca de 9,5 m. Estes poços têm ainda um diâmetro médio que ronda os 4 m, havendo exceccionalmente um poço com mais de 10 m de diâmetro.

Charcos

Os inúmeros charcos de água existentes nesta região, armazenam a maioria do volume de água superficial explorada. Estes são semelhantes a poços de diâmetro alargado, captando a água no aquífero existente na camada de alteração superficial do granito. São geralmente mais profundos do que os poços e não apresentam qualquer revestimento.

A água captada nos poços e nas charcas é a existente no aquífero superior não-confinado ou freático, instalado na camada superficial de granito, bastante alterada e que se comporta como sendo um meio poroso (Fig.22-c).

Na figura seguinte (Fig.23) mostra-se o enquadramento hidrogeológico dos poços e dos charcos. Estes pontos são muito úteis para que se faça medições do nível freático.

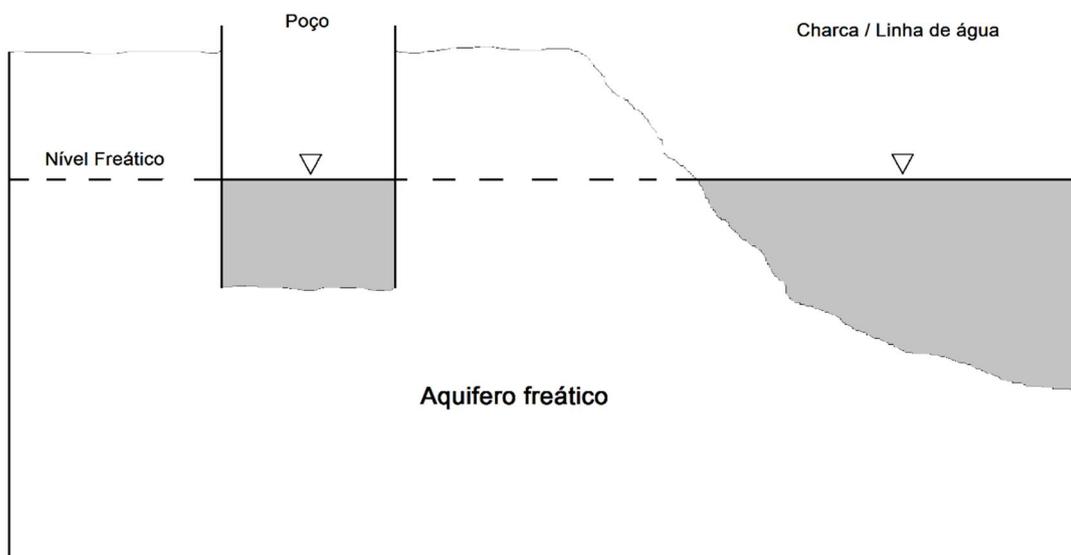


Figura 23- Esquema ilustrativo do nível freático em poços e charcas (em muitas situações equivalentes a linhas de água), criado em Adobe Illustrator CC 2015.

"Minas de água"

Na área existem pontos onde a água subterrânea emerge, e onde, em alguns casos, foram implantadas galerias para potenciar o volume de água captada (Fig.22-b). Estas são vulgarmente designados por "minas de água". A água captada nas minas acaba por pertencer também ao aquífero freático.

Linhas de água

Estas linhas de água são, dependendo da severidade da seca, perenes ou intermitentes. A ribeira do Ameal apresenta-se ao longo do seu comprimento bastante escavada e com muita vegetação nas margens (Fig.22-d). A água que circula nesta ribeira é utilizada sobretudo no regadio e na pastorícia.

Furos

No domínio em análise estão seguramente implantados mais furos do que os identificados no presente estudo. Contudo, a maioria situa-se em terrenos particulares e normalmente vedados, não sendo assim possível aceder a todos.

Os furos F1 e F2 são utilizados para consumo humano, sendo o F1 também utilizado para regadio de pomares. Estes furos captam água a profundidades diferentes, tendo o F1 e o F2, 70 m e 30 m de profundidade total, respetivamente. Por outro lado o furo F3 foi abandonado por motivo desconhecido (Fig.22-e).

Os furos AC1 e AC2, representados na figura 6, apresentam características distintas e estão inseridos no Plano de Pesquisa e Prospeção efetuado pela empresa, SONDAGENS E FUNDAÇÕES ACAVACO, LDA, no ano de 2000, na Área de Concessão das Termas da Touca (Fig.24).

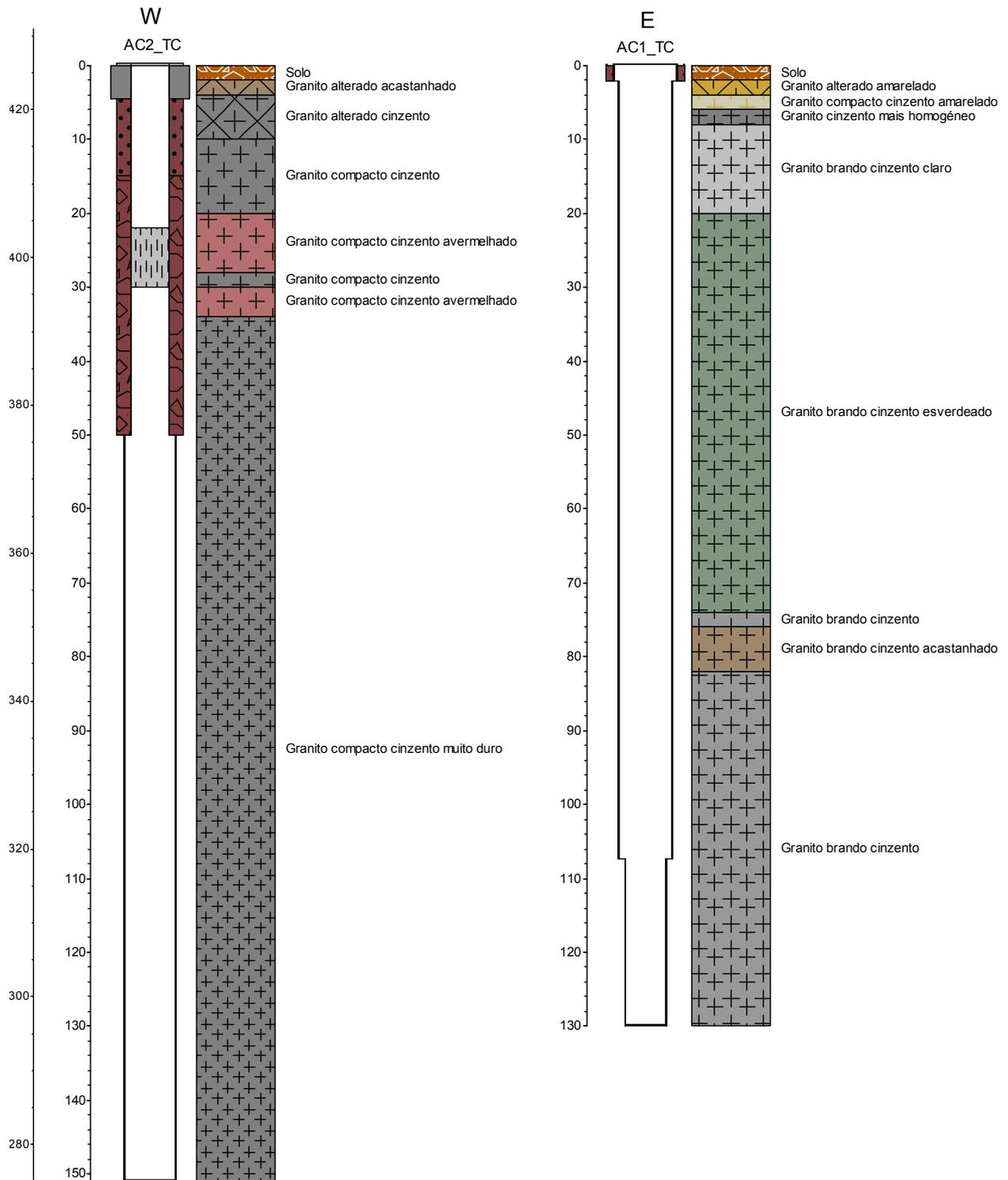


Figura 24- Estrutura geral e logs litológicos dos furos AC1 e AC2 nas Termas da Touca (adaptado de ACavaco, 2000), integrados no Plano de Pesquisa e Prospeção na Área de Concessão das Termas da Touca. Desenho construído com software RockWorks 16 versão 2015.5.6.

De acordo com os elementos constantes no relatório da empresa ACavaco (2000) os furos AC1 e AC2, apresentam as seguintes características gerais:

- O método utilizado na abertura dos furos com inclinação vertical foi de percussão pneumática;
- As profundidades atingidas são: AC1 130 m; AC2 151 m.
- Os diâmetros de perfuração foram:

(1) AC1 - diâmetro inicial de 12,25" até os 2,15 m, de 8,5" até os 107,35 m e de 6,75" até o final;

(2) AC2 - diâmetro inicial de 12,25" até aos 4,5 m, de 8,5" até os 50 m e 6,75" até o final.

- Ambos os furos atravessam exclusivamente rochas graníticas, contudo estas apresentam constituição e texturas variáveis em profundidade.
- Ao longo do furo AC1 e em toda a extensão (130 m de profundidade) o granito é sempre classificado com "brando";
- No furo AC2 perfuraram-se os primeiros 10 m em granitos alterados, dos 10 aos 34 m encontraram-se granitos compactos e daí até final atravessaram-se granitos compactos muito duros.

Ambos os furos intersectaram níveis produtivos, mas a diferentes profundidades.

- No furo AC1 encontraram-se níveis produtivos de água minerotermais a partir dos 15 m;
- No furo AC2 os níveis produtivos de água minerotermais apareceram a partir dos 18,5 m;

O furo AC1 foi "abandonado" devido ao facto de apresentar um caudal de exploração relativamente baixo para o pretendido; o furo não foi devidamente entulhado, contudo foi colocada uma cabeça estanque.

O furo AC2 foi transformado em captação (Fig.25) através da aplicação de uma coluna definitiva em aço inox até os 50 m com um diâmetro de início ao fim de 5", sendo que a restante extensão do furo ficou em *open hole* (sem revestimento). O revestimento em aço inox AISI 304 compreende tubo-fechado dos 0 aos 22 m e entre os 30 e os 50 m, enquanto dos 22 aos 30 m utilizou-se tubo-ralo. Colocou-se um maciço filtrante de areão entre os 14 e os 50 m, com características adequadas às das camadas aquíferas aproveitadas. O isolamento dos níveis aquíferos captados foi feito através da utilização de cimento-bentonite desde os 14 m até à superfície (ACavaco, 2000).



Figura 25- Aspeto do furo AC2: tubagem em aço inox, e respetivo equipamento para bombagem e canalização da água.

4.1.4- Piezometria do Aquífero freático

De acordo com o referido no ponto 4.1.1, na área em estudo ocorre nos primeiros níveis da rocha granítica (capa de alteração e fraturação densa) um importante aquífero não-confinado (freático). A maioria das "minas de água", assim como os poços e charcos estão implantados neste aquífero.

No sentido de caracterizar a hidrodinâmica do aquífero freático fizeram-se medições da profundidade da água nos poços, charcos e linhas de água, utilizando-se uma sonda de nível Geotechnical Instruments DM2.1-30. Os registos foram efetuados em períodos nos quais os pontos de água não se encontravam em fase de exploração, nomeadamente em fevereiro e maio de 2015.

Na tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos para os valores de cota à superfície, profundidade da água e nível freático.

Tabela 6- Dados relativos aos parâmetros físicos medidos nos diferentes pontos de água em cada campanha.

Ponto de água	Designação em mapa	Cota da superfície (m)	Prof. água (m) Fev-15	NF (m) Fev-15	Prof. da água (m) Maio-15	NF (m) Maio-15
Poço 2	P2	476,00	2,33	473,67	3,00	473,00
Poço 3	P3	475,00	2,27	472,73	4,16	470,84
Poço 4	P4	476,00	1,82	474,18	1,75	474,25
Poço 5	P5	464,00	3,90	460,10	6,20	457,80
Poço 6	P6	451,00	1,54	449,46	1,90	449,10
Poço 7	P7	454,00	1,86	452,14		
Poço 8	P8	451,00	0,57	450,43		
Poço 10	P10	446,00	0,72	445,28	2,40	443,60
Poço 11	P11	446,00	1,09	444,91	1,60	444,40
Poço 12	P12	461,00	2,24	458,76	2,94	458,06
Poço 14	P14	453,00	0,94	452,06	1,90	451,10
Poço 15	P15	425,00	0,30	424,70	1,00	424,00
Poço 17	P17	475,00			1,80	473,20
Poço 19	P19	452,00			2,45	449,55
Poço 21	P21	500	0,50	499,5	2,00	497,50
Poço 22	P22	487	3,00	484	4,80	479,20
Poço 23	P23	437	1,50	435,5	3,80	431,70
Charco 1	B1	492,00	1,00	491	3,00	488,00
Charco 2	B2	476	1,00	475	3,00	472,00
Charco 3	B3	473	2,00	471	4,60	466,40
Charco 4	B4	427	0,90	426,1	2,50	423,60
Mina 4	M4	430,00	2,00	427,50	2,50	427,50
Ribeira 1	L1	452,00	1,00	451,00	1,00	450,00
Ribeira 2	L2	425,00	1,74	423,26	1,00	422,26
Ribeira 3	L3	425,00	1,00	424,00	1,00	423,00

Nota: NF – nível freático, Prof. - profundidade

Com o auxílio do *software* Surfer 12.0.626 (Golden Software, 2014) e utilizando-se o método de *krigagem*, processo que estima os valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes, considerados como interdependentes. Trata-se, em último caso, de um método de estimativa por médias móveis (Landim, 2006). Construíram-se assim cartas piezométricas e de fluxo subterrâneo para as campanhas de fevereiro-2015 e maio-2015, relativas ao aquífero freático no domínio estudado (Fig.26 e 27).

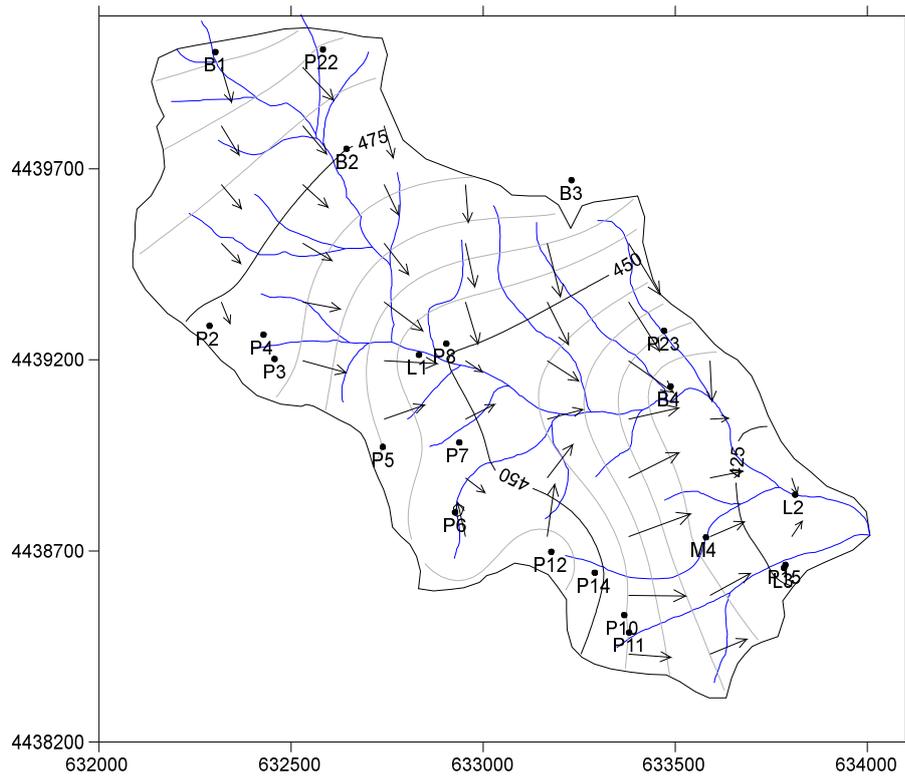


Figura 26 - Carta de fluxo subterrâneo na micro-bacia da ribeira do Ameal no mês de fevereiro de 2015, criada com o software Surfer 12.0.626 (Golden Software, 2014).

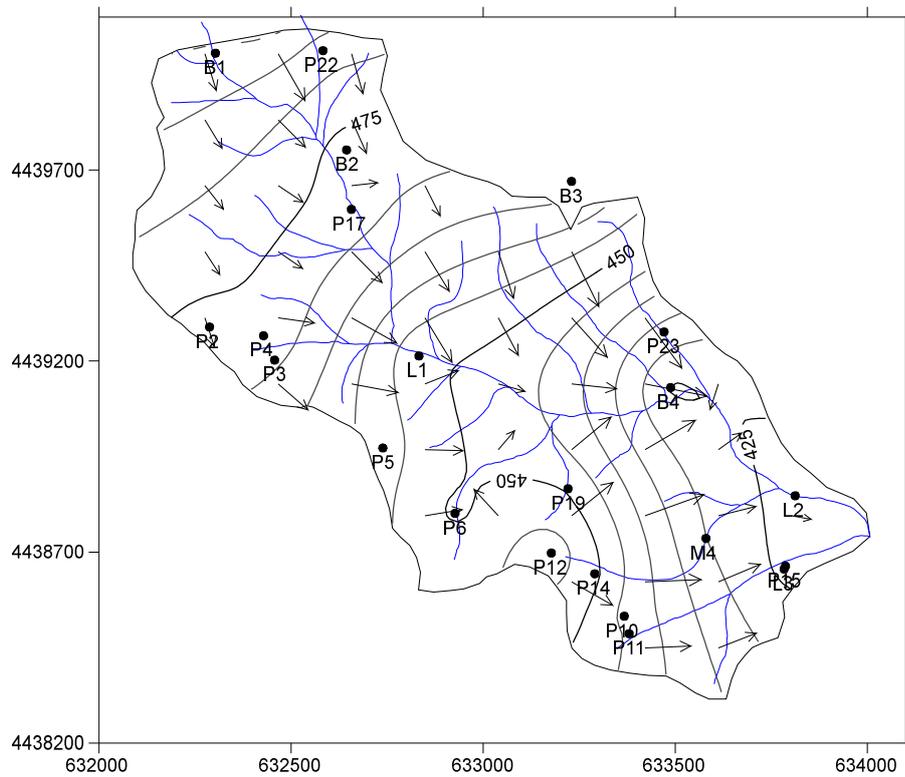


Figura 27 – Carta de fluxo subterrâneo na micro-bacia da ribeira do Ameal no mês de maio de 2015, criada com o software Surfer 12.0.626 (Golden Software, 2014).

A partir das duas cartas de fluxo (Fig.26 e 27) foi possível obter as interpretações expressas na Tabela 7 .

Tabela 7 – Interpretações acerca de alguns parâmetros analisados nas cartas de fluxo das duas campanhas.

Parâmetros	Fevereiro 2015	Maio 2015
Nível Freático (cota Máx. e Mín.) (m)	499,9 e 423,3	498,0 e 424,0
Sentido geral do fluxo	As cartas evidenciam uma clara semelhança entre os dois períodos, o que reflete estabilidade hidráulica do aquífero. Na parte norte da micro-bacia o sentido de escoamento faz-se de NW para SE, enquanto no lado Sul o fluxo faz-se de uma maneira geral de WSW para ENE.	
Variações locais no sentido geral	<p>No poço P6 existe uma convergência nas linhas de fluxo o que poderá indicar que nesta zona ocorre uma importante recarga aquífera, e, assim, corresponder a um domínio mais permeável logo com maior infiltração.</p> <p>No poço P12 ocorre o oposto do descrito anteriormente, pois o sentido do fluxo é divergente, o que poderá indicar que naquela sitio há descarga de água para níveis mais profundos ou captação.</p>	<p>À semelhança da campanha anterior nas envolventes do P6 continua a existir uma convergência do sentido do fluxo e conseqüente haverá condicionamento dos mesmos fatores.</p> <p>No P12 continua igualmente a existir uma divergência do sentido do fluxo apesar de menos notório.</p> <p>Existe ainda a sul de B4 uma zona onde deverá ocorrer recarga aquífera mais intensa, (processo semelhante ao descrito para P6).</p>
Relação entre água subterrânea e a superficial (linha de água)	<p>Esta relação é claramente variável no domínio estudado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Há setores em que os dois fluxos são paralelos, por exemplo no setor mais a montante. - Noutros setores ocorre alimentação da linha de água a partir do aquífero, como por exemplo no setor central junto a L1. - Ainda ocorrem setores em que o aquífero é alimentado a partir da ribeira. 	
Velocidade de fluxo (gradiente hidráulico)	A velocidade de fluxo é em geral homogénea, sendo que existe uma velocidade mais baixa junto ao limite da bacia no lado W; na foz da ribeira também parece haver uma diminuição da velocidade de escoamento subterrânea.	

Tendo como base as cartas de fluxo anteriormente apresentadas, foi possível construir uma carta evidenciando a variação do nível freático entre as duas campanhas (Fig.28), utilizando novamente o *software* Surfer 12.0.626 da Golden Software (2014), para se fazer a subtração dos dados dos níveis freáticos de fevereiro aos do mês de maio, através da operação *Math*.

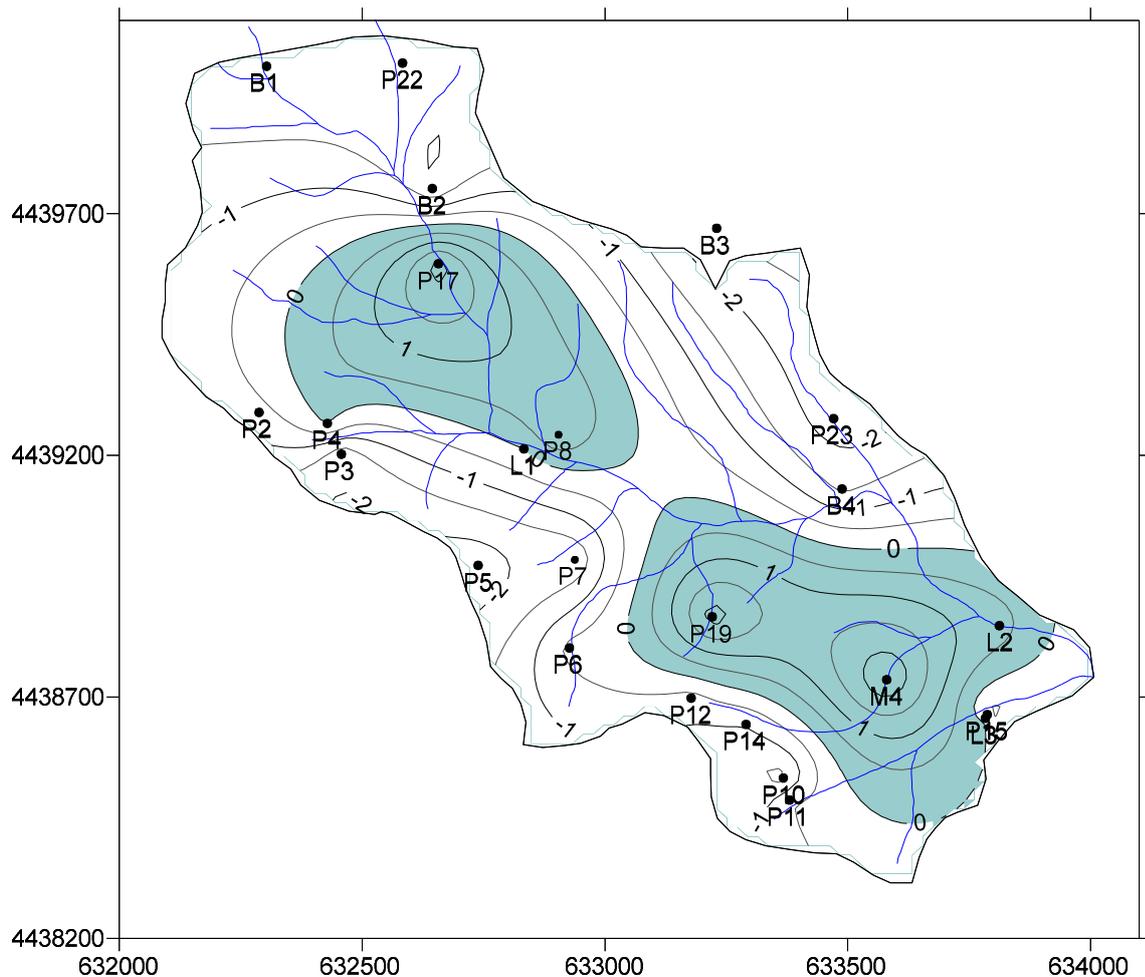


Figura 28- Carta da variação do nível freático entre fevereiro e maio de 2015, criada com o software Surfer 12.0.626 da Golden Software (2014) a partir das Figuras 26 e 27.

Na carta é possível observar que:

- Entre fevereiro e maio ocorreu uma subida do nível freático em dois domínios centrais da zona estudada - mb RA (mancha azul).
- Importa referir que ocorreu uma elevada precipitação no início de 2015 e, assim, tendo em conta o retardamento no processo de recarga aquífera, era expectável uma variação suave no nível hidrostático ao longo dos meses seguintes.
- Contudo, no mês de maio e contrariamente ao mês de fevereiro, é visível uma maior concentração da água na zona mais central da bacia o que confirma a hidrodinâmica anual característica das bacias hidrográficas.

4.2- Hidroquímica

Cada massa de água tem características físico-químicas muito próprias, sendo que existem águas com composições químicas muito semelhantes, mas que quando analisadas pormenorizadamente apresentam estruturas que as diferenciam (Simões, 1993).

Esta variabilidade na composição química das águas subterrâneas tem influência direta dos materiais geológicos que esta atravessa ao longo do seu percurso, consequência de alterações físico-químicas e biológicas que vão ocorrendo ao longo do fluxo.

Deste processo resultam composições químicas diversas e em constante mutação, sempre que as condições de equilíbrio sofram alteração. As principais reações químicas que se envolvem neste processo são as reações ácido/base, de precipitação/dissolução, de complexação e de oxidação/redução, que dependem da composição das fases sólida, líquida e gasosa em contacto (Castilho, 2008).

O conhecimento da composição química das águas tanto subterrâneas como superficiais da zona em estudo poderá permitir a identificação dos processos hidrogeoquímicos atuantes na sua formação.

A composição química de qualquer água reflete não só o tipo de rochas por onde circula, como as condições físico-químicas do meio e da água, o tipo de solo e as atividades antropogénicas que a vão modificando ao longo do seu percurso, e que serão tanto mais evidentes e marcantes quanto maior for o tempo de residência e, portanto, de exposição a estas condições.

4.2.1- Inventário de pontos de água

Na área em estudo foram feitas medições de alguns parâmetros físico-químicos das águas num total de 21 pontos de água, no mês de fevereiro de 2015, entre eles: 11 poços, 4 minas, 2 ribeiras e 4 furos. Para o efeito foram determinados os valores de temperatura, pH, condutividade elétrica e Eh. Procedeu-se à utilização e prévia calibração dos elétrodos do aparelho de leitura multiparamétrica WTW® 340i. Para a obtenção dos valores há a necessidade de que estes sejam estabilizados.

Os valores obtidos nesta campanha, para os vários parâmetros físico-químicos estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8- Parâmetros físico-químicos da água medidos in situ nos pontos inventariados.

Ponto de água ref.	Longitude	Latitude	Cota na superfície (Google Earth)	Temp. (°C)	Cond. Elétrica (µS/cm)	pH	Eh (mV)	pe
Poço 1*	40°05,761'	007°27,224'	495	13,9	68	5,8	630	11,08
Poço 3*	40°05,588'	007°26,768'	475	9,4	65	7,1	648	11,58
Poço 6*	40°05,337'	007°26,450'	451	13,8	61	6,4	638	11,22
Poço 7*	40°05,439'	007°26,435'	454	10,5	62	7,6	583	10,38
Poço 9*	40°05,215'	007°26,455'	452	10,1	99	6,7	640	11,41
Poço 10*	40°05,194'	007°26,133'	446	12,6	107	6,4	632	11,16
Poço 13*	40°05,212'	007°26,315'	462	11,8	51	6,5	651	11,53
Poço 15*	40°05,261'	007°25,844'	425	8,5	113	6,6	609	10,92
Poço 16**	40°05,879'	007°27,091'	502	15,3	153	6,94	574	10,05
Poço 17**	40°05,765'	007°26,632'	475	13,7	72	5,63	554	9,74
Poço 18**	40°05,676'	007°26,670'	465	21,1	66	5,6	552	9,47
Mina 1*	40°05,457'	007°26,439'	454	12,1	84	7,5	615	10,88
Mina 2*	40°05,191'	007°26,141'	447	13,5	99	7,1	609	10,72
Mina 3*	40°05,261'	007°25,991'	432	12,5	77	5,7	611	10,79
Mina 6**	40°05,528'	007°26,090'	432	16,9	55	5,48	569	9,89
Ribeira 2*	40°05,357'	007°25,833'	425	11,2	63	6,4	598	10,62
Ribeira 3*	40°05,260'	007°25,823'	425	11,7	175	7	575	10,19
Furo 1**	40°05,757'	007°26,464'	473	15,5	234	7,01	540	9,44
Furo 2**	40°05,438'	007°26,175'	443	16,1	77	6	542	9,46
Furo 3**	40°05,338'	007°25,662'	425	17,1	380	9,11	18	0,31
Furo AC2**	40°05,263'	007° 25.905'	426	18,2	376	8,94	-102	-1,77

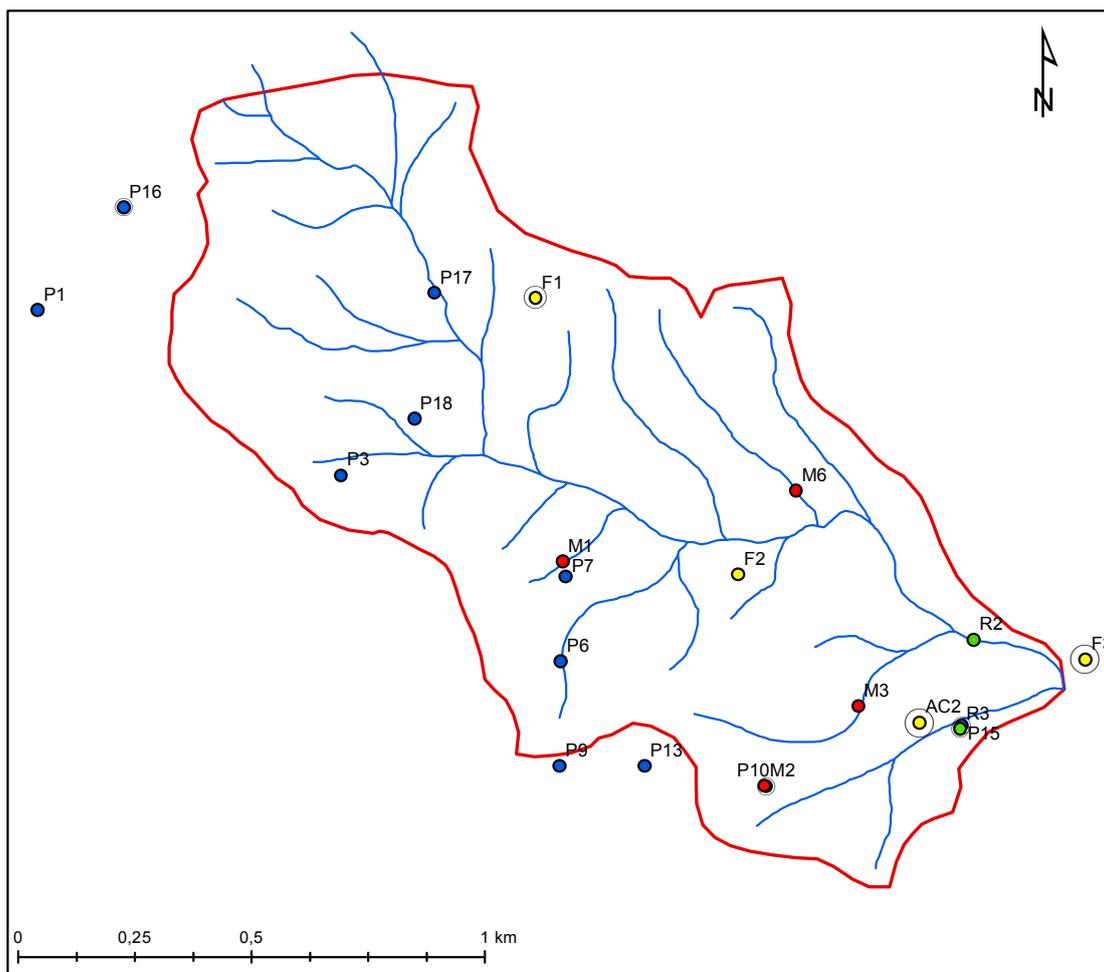
Notas: T – temperatura da água, CE – condutividade elétrica da água,
 (*) Fevereiro de 2015, (**) Maio de 2015.

Com os valores apresentados nesta tabela foram feitos mapas de quantidades para cada um dos parâmetros medidos, de modo a ter uma melhor percepção dos valores em causa e da sua localização na área estudada. Assim como os dados de F3 e AC2, que são utilizados mais à frente para comparação de parâmetros físico-químicos.

Uma vez que não houve repetição das leituras nos mesmos pontos durante as duas campanhas, não se consegue saber a variação térmica da água entre estes dois meses do ano de 2015, no entanto, verifica-se que a temperatura da água dos poços em maio é geralmente mais elevada do que em fevereiro, o que seria expectável, com exceção do ponto P17 em que os valores da temperatura da água são idênticos aos obtidos durante o mês de fevereiro (Tab.8). Verifica-se que as maiores temperaturas foram registadas durante o mês de maio de 2015, com uma média de cerca de 16,7 °C, tendo-se medido temperaturas em média 5 °C mais baixas durante o mês de fevereiro. No inverno há no entanto pontos cuja temperatura é ligeiramente mais elevada, como é o caso dos pontos P1 e P6 (Tab.8).

A temperatura da água medida no ponto M6 é semelhante à obtida nas águas dos furos F1, F2 e F3 e ligeiramente inferior à da água do furo AC2.

No ponto P18 a temperatura da água é bastante mais elevada do que nos restantes pontos, sendo que estes valores poderão ter origem na sua maior exposição solar e ao facto de este poço ter uma cobertura de betão.



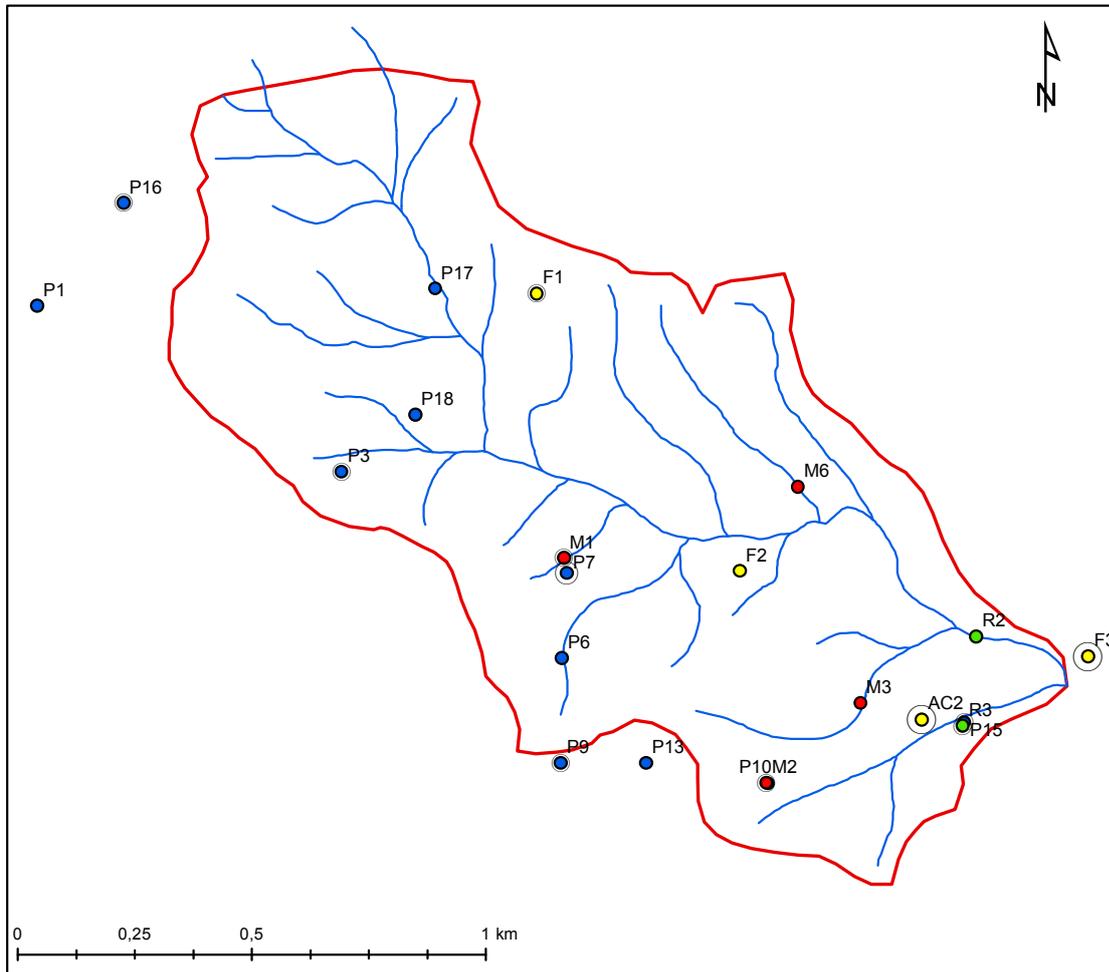
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

○ 51 - 75	● Poço
○ 75 - 100	● Mina
○ 100 - 200	● Ribeira
○ 200 - 300	● Furo
○ 300 - 380	□ Micro-bacia rib ^a Ameal

Figura 29- Mapa com os valores de condutividade elétrica, corrigidos para 20 °C, medidos entre fevereiro e maio de 2015.

Na figura 29 estão representados os valores da condutividade elétrica (CE) da água medida nos pontos inventariados, corrigidos para a temperatura de 20 °C, o que, em conjunto com o facto de haver diferenças claras entre as águas amostradas, torna possível a integração dos valores das duas campanhas para comparação. É possível observar que a condutividade é mais elevada nos furos AC2 e F3, o que sugere a captação de águas mais mineralizadas, acompanhados de perto pela água da Ribeira 3 e do Poço 15, ambos geograficamente próximos do furo AC2; do furo F1 e dos Poço 10 e 16, estes mais afastados do local das Termas da Touca. As águas dos restantes poços têm uma condutividade elétrica relativamente baixa

(muito pouco mineralizada), o que pode indicar que indica que a água captada terá diferente origem.

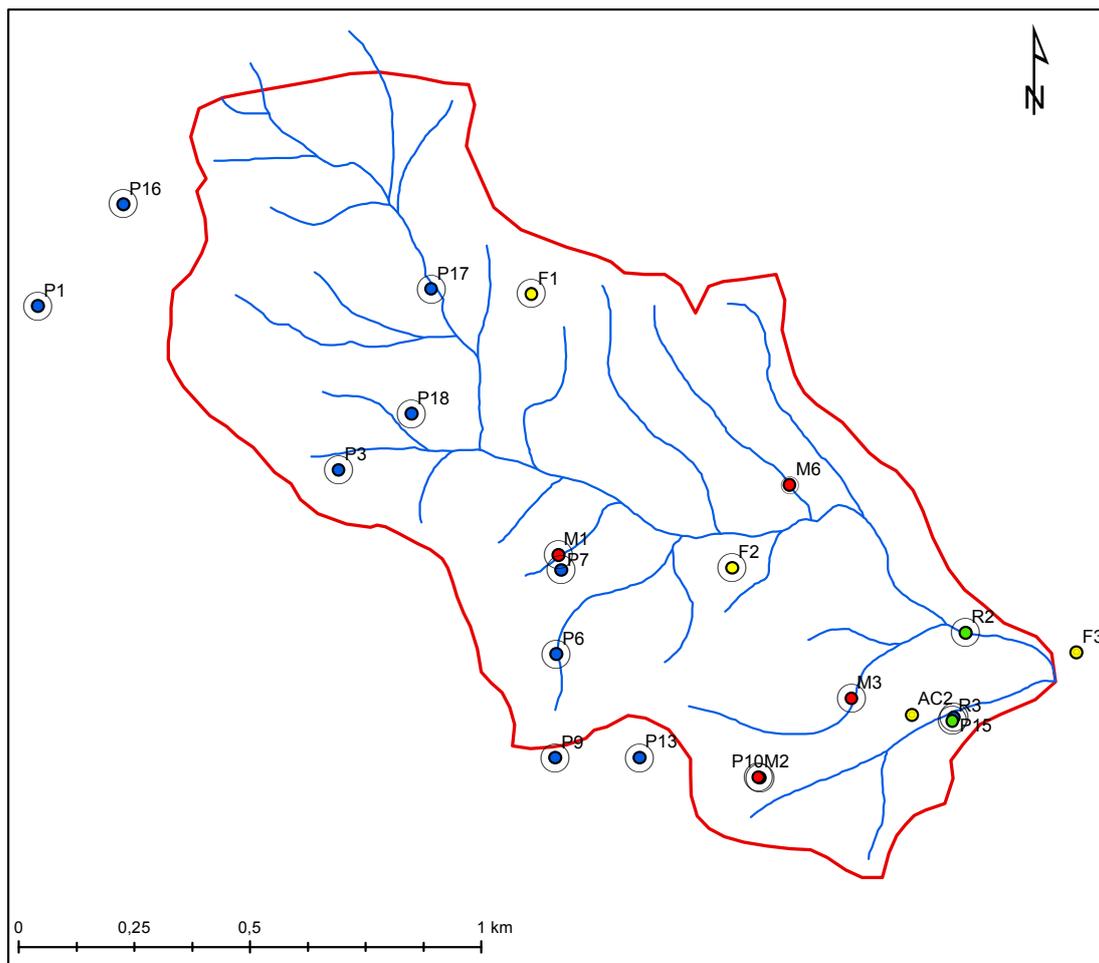


pH

◦ 5,48 - 5,5	● Poço
○ 5,5 - 6,5	● Mina
○ 6,5 - 7,5	● Ribeira
○ 7,5 - 8,5	● Furo
○ 8,5 - 10	□ Micro-bacia rib ^a Ameal

Figura 30- Mapa com os valores de pH, corrigidos para uma temperatura de 20 °C, medidos entre fevereiro e maio de 2015

No mapa da figura 30 é possível constatar que o pH mais elevado foi medido na água dos furos AC2 e F3, com um valor por volta dos 9. No que respeita aos poços a grande maioria destes tem um pH ácido, por volta dos 5,5 a 6,5 a neutro.



Eh (mV)

- | | | | |
|---|------------|---|------------------------------------|
| ○ | -102 - 150 | ● | Poço |
| ○ | 151 - 500 | ● | Mina |
| ○ | 501 - 660 | ● | Ribeira |
| | | ● | Furo |
| | | □ | Micro-bacia rib ^a Ameal |

Figura 31- Mapa com os valores de Eh, com correção térmica, medidos entre fevereiro e maio de 2015

Na figura 31 é possível observar que os poços e furos com exceção do AC2 e F3 apresentam um Eh (potencial de oxi-redução) concordante com os valores obtidos para águas subterrâneas em contacto com a atmosfera embora um pouco elevados. No caso da água dos furos AC2 e F3 o Eh tem um valor de -102 mV e 18 mV, respetivamente. Podemos ainda dizer que nos casos onde o Eh é mais elevado, existe um ambiente que favorece a oxidação, enquanto nos casos onde os valores são mais baixos, indica um ambiente muito redutor.

Se juntarmos as conclusões tiradas de cada mapa é possível dizer que a água dos poços, devido aos seus valores de pH, condutividade elétrica, Eh e temperatura, é constituída essencialmente por água das chuvas com muito pouco tempo de residência e conseqüentemente muito baixa mineralização, onde existe ainda um ambiente oxidante.

O furo F2 apresenta geralmente valores muito próximos dos medidos nos poços e minas em geral.

Os parâmetros medidos em F1 apresentam características intermédias entre os poços, na sua generalidade, e os furos AC2 e F3. Este furo capta água por volta dos 70 m de profundidade, apresentando valores de condutividade elétrica, pH e temperatura relativamente elevados, sugerindo a existência de uma água mais mineralizada que a captada em níveis mais superficiais, este ambiente assim como o dos poços continua a ser oxidante.

A água captada nos furos AC2 e F3, mostrou ser bastante semelhante, o que dá ideia de que ambos os furos podem captar níveis aquíferos semelhantes. A água está mais mineralizada, com uma condutividade elétrica substancialmente maior do que a das restantes águas, o que mostra que houve uma maior quantidade de sais dissolvidos. O Eh é negativo no caso do furo AC2 o que indicia uma água captada num ambiente fechado ao oxigénio atmosférico e bastante redutor. O valor do pH apresenta-se mais elevado nos furos AC2 e F3, do que nos restantes pontos com águas de características próximas das águas dos poços que captam água do aquífero freático. Tendo como base a Figura 16 (mapa tectónico da mb RA) e a localização dos furos AC2 e F3 é possível dizer que ambos os furos estão aproximadamente alinhados segundo a fratura N 60-70° E, o que explicaria as características físico-químicas semelhantes que apresentam, assim como o cheiro (ovos podres).

Os valores obtidos nos parâmetros físico-químicos da água foram colocados em gráficos bivariados para se analisar a relação interparamétrica e a possível discriminação de grupos de águas diferentes (Fig.32, 33 e 34 e Tab.9).

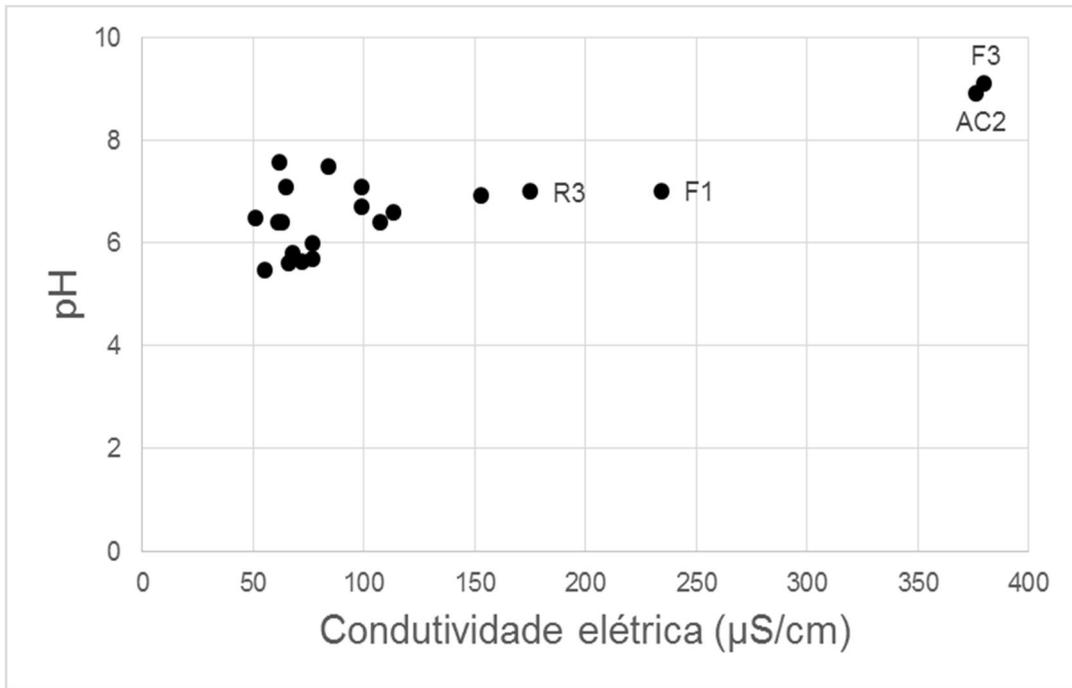


Figura 32- Gráfico com a relação pH / condutividade elétrica das águas amostradas.

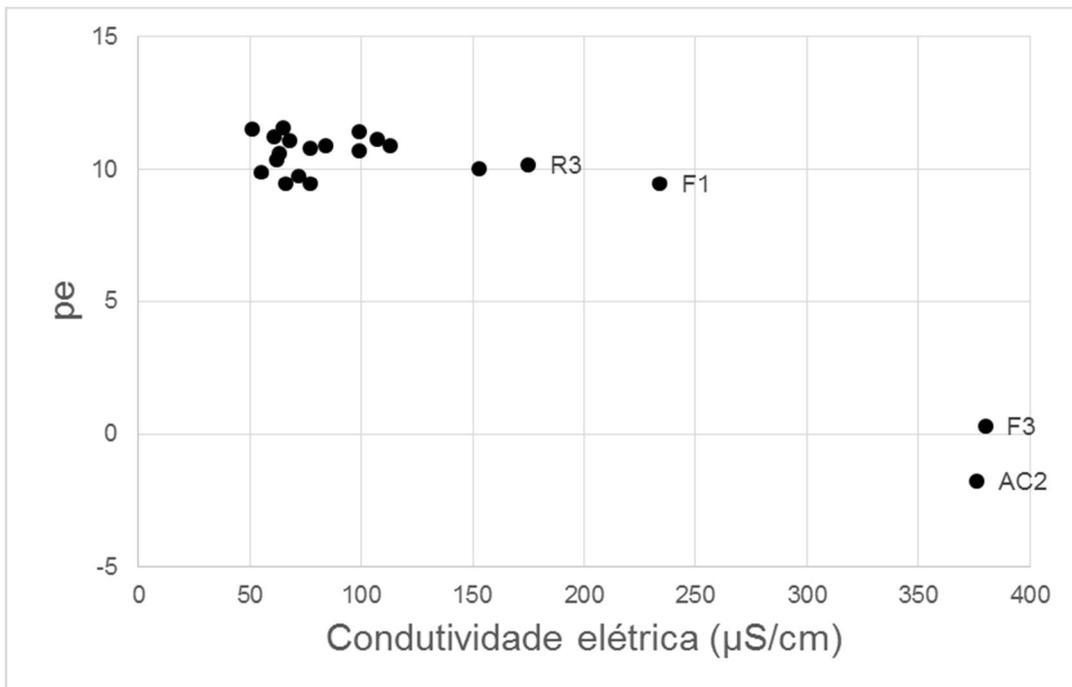


Figura 33- Gráfico com a relação pe / condutividade elétrica das águas amostradas.

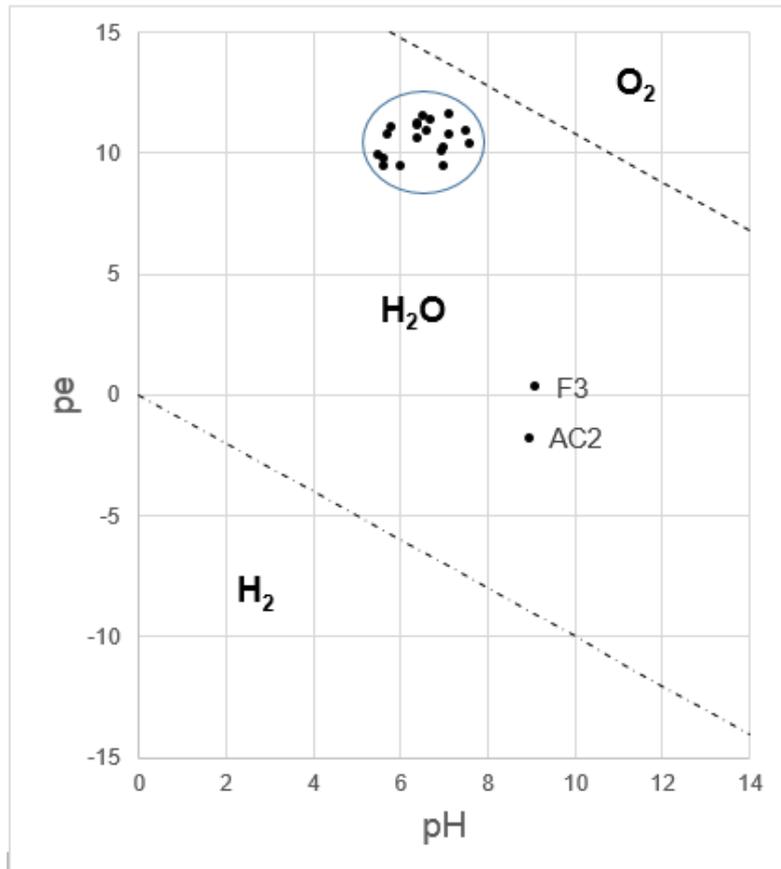


Figura 34- Diagrama com a relação pe / pH para as águas amostradas (adaptado de Johnson et al., 1989).

Tabela 9- Relações interparamétricas utilizadas e respectivas interpretações.

Relações	Interpretação
pH/CE	Nesta relação parece existir uma tendência do aumento do pH e da condutividade elétrica em direção aos pontos F3 e AC2 que aparecem bastante destacados neste gráfico, discriminando este grupo de águas mais mineralizadas e com pH alcalino. Os pontos F1 e R3 encontram-se na linha de tendência de pH/CE em posição intermédia entre os restantes pontos de água e os furos F3 e AC2.
pe/CE	Nesta relação também parece existir uma ligeira tendência do aumento da condutividade elétrica com a diminuição do pe. Os pontos F3 e AC2 estão novamente bastante afastados dos restantes, mantendo-se o ponto F1 (e em menor grau R3) em posição intermédia nesta tendência.
pe/pH	Os pontos inventariados com exceção de F3 e AC2 apresentam-se numa zona do gráfico que corresponde, segundo Johnson et al., (1989), a águas de ambientes em contacto com a atmosfera. Os pontos F3 e AC2, segundo a classificação do mesmo autor, situam-se numa zona em que se projetam as águas subterrâneas de ambientes de transição ou isoladas do contacto com a atmosfera.

Embora estas interpretações devam ser encaradas com alguma reserva, estes gráficos e mapas mostram que os pontos de água que correspondem a tipos de massas de água superficiais (linhas de água), subsuperficiais (poços de água e minas) e subterrâneas (furos), projetam-se na sua generalidade em áreas que sugerem ambientes em contacto com a atmosfera e por isso apresentam valores de pe e pH compatíveis com este facto. Existem ainda claramente dois pontos que correspondem a furos (F3 e AC2) que sugerem captações em massas de água subterrâneas afastadas do contacto com a atmosfera.

4.2.2- Água das Termas da Touca (mineroterma)

A caracterização hidroquímica da água captada através do furo AC2 nas Termas da Touca (Tab.10) foi efetuada a partir de:

- Elementos fornecidos pela Camara Municipal do Fundão (CM Fundão), de análises químicas feitas entre novembro de 2001 e julho de 2002 e de setembro de 2009 a dezembro do mesmo ano, elaboradas pelo laboratório de análises do Instituto Superior Técnico;
- Elementos fornecidos pela CM Fundão, existentes nos Estudos e Trabalhos Para Qualificação de Recurso Hídrico Subterrâneo (ETPQRHS) (Côa Rupestre, 2009);
- Medições *in situ*, nos furos AC2 e F3, efetuadas em maio de 2015.

Tabela 10- Parâmetros físico-químicos da água emergente nas Termas da Touca (AC2 e F3), (*) Furo particular situado 100 m a E de AC2.

Ponto de água	Data	T. (°C)	CE (µS/cm)	pH	Eh (mV)	RS a 180°C (mg/L)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	Dureza (mgCaCO ₃ /L)
Análises do Instituto Superior Técnico (IST, 2001a - 2001b, 2002a - 2002e, 2009a-2009d)								
Furo AC2	Nov-2001	(20)	341	8,71	-	211	109	15
	Dez-2001	(20)	307	8,96	-	203	102	10
	Jan-2002	(20)	311	8,89	-	210	102	12
	Fev-2002	(20)	307	9,00	-	215	104	10
	Mai-2002	(20)	317	8,68	-	203	103	13
	Jun-2002	(20)	327	8,88	-	209	101	9
	Jul-2002	(20)	321	9,12	-	210	102	6
	Set-2009	(20)	312	9,06	-	222	97	4,7
	Out-2009	(20)	321	9,17	-	-	-	-
	Nov-2009	(20)	324	9,00	-	220	102	5,7
Dez-2009	(20)	326	9,07	-	225	102	11	
Elementos constantes de ETPQRHS (Côa Rupestre, 2009) – valores médios								
Furo AC2	Ago-2009	18,5	346	8,92	-141	-	-	-
Poço Antigo	Ago-2009	25,2	218	7,22	-42	-	-	-
Medições efetuadas <i>in situ</i>								
Furo AC2	Mai-2015	18,2	376	8,94	-102	-	-	-
Furo 3*	Abr-2015	17,1	380	9,11	18	-	-	-

Tendo em conta os dados da tabela 3 relativamente aos parâmetros físico-químicos podem expressar-se as seguintes conclusões acerca de cada um dos deles.

Temperatura - Nas análises feitas pelo Instituto Superior Técnico, este parâmetro não pode ser tido em conta por não ter havido medições *in situ*. O valor médio da temperatura nas medições feitas em Côa Rupestre (2009) e nas determinações efetuadas no âmbito desta tese, em maio de 2015, é muito semelhante. Já em F3 a água tem uma temperatura inferior. Côa Rupestre (2009) fez ainda a medição da temperatura de um poço antigo (antigo abastecimento de água das Termas) que tem uma temperatura superior a 25°C sendo esta bastante superior à medida nos furos. Segundo Schoeller (1962, citado em Custodio & Llamas, 2001) quando a temperatura de emergência de uma determinada água supera em pelo menos 4 °C o valor médio da temperatura anual local a água é considerada como sendo termal.

Condutividade eléctrica - Estes valores apresentam uma relativa homogeneidade entre medições nas análises do IST e mesmo na análise feita em Cõa Rupestre (2009). Nas medições realizadas os valores em ambos os furos são mais altos (em 30 a 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$) do que nas feitas anteriormente, o que se está dentro de um intervalo de variação de 10%. Quanto à condutividade eléctrica da água do poço é notória a diferença em relação aos valores medidos nos furos, sendo que esta poder-se-á dever a uma provável mistura de águas. Segundo *Pure Water Handbook* (1997), a água é considerada como tendo uma mineralização média, pois tem valores compreendidos entre os 200 e os 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

pH - O valor do pH é muito próximo em todas as análises feitas, variando entre os 8,92 e os 9,1 (valores médios). O pH é elevado pois este tem em conta o gás carbónico dissolvido e a alcalinidade (que é bastante alta). No poço antigo o pH é mais baixo o que poderá indicar mistura com águas mais ácidas.

Eh - Ambos os valores foram obtidos após aproximadamente 20 minutos de bombagem, sendo que neste intervalo os valores já se encontravam estabilizados e mantiveram-se relativamente constantes até ao final. De salientar que os valores de Eh são negativos no furo AC2 e no poço antigo, pelo que o ambiente será muito redutor.

Resíduo seco a 180°C - Como é visível no ano hidrológico de 2001/2002, os valores do resíduo seco apresenta-se constantes (203 a 215 mg/L), pelo que se pode considerar que não há contribuição de água de precipitação que contribuiria para a diluição da água subterrânea. Segundo a classificação de Petraccia *et al.*, (2006; citado em Negrão, 2012) as águas minerais podem ser classificadas em 4 tipos diferentes sendo que esta é definida como, água com baixo conteúdo mineral (resíduo seco entre 50 e 500 mg/L).

Alcalinidade - Os principais iões responsáveis pela alcalinidade são o bicarbonato e o carbonato. Os valores destes iões nas análises são aproximadamente constantes e relativamente baixos embora dentro dos valores médios de alcalinidade para as águas subterrâneas (30 a 500 mg CaCO_3/L , segundo Moraes, 2008).

Dureza - Os valores da dureza mostraram-se bastante baixos em geral, pois os valores máximos e mínimos foram de 15 e 4,7 mg CaCO_3/L respetivamente. Esta água é caracterizada como sendo macia, já que os valores são inferiores a 60 mg CaCO_3/L (Hem, 1985). De salientar que os valores mais elevados de dureza obtidos nas análises químicas ocorrem em épocas de maior precipitação enquanto os mais baixos ocorrem em épocas de menor precipitação.

4.2.3- Composição química da água das Termas da Touca (AC2)

No seguimento das análises feitas pelo IST de Novembro de 2001 a Julho de 2002 e de Setembro de 2009 a Dezembro do mesmo ano, os valores para cada espécie analisada apresentam-se na tabela 11.

Tabela 11- Dados das análises químicas referentes as espécies de aniões e catiões existentes na água captada em AC2. (<) Valor inferior ao limite detetável.

ID furo	Data	Aniões (mg/L)									Catiões						
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻	SH ⁻	H ₃ SiO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Li ⁺
AC2	13/nov/01	16	15,3	3,5	120	<0,3	<0,005	11,7	0,4	2,9	69	0,84	0,25	5,6	0,27	0,12	0,48
AC2	18/dez/01	15,1	12,9	5	108	<0,3	<0,005	12,2	0,6	5	70	0,72	0,23	3,7	0,19	0,11	0,5
AC2	15/jan/02	15,9	14,5	4,2	110	<0,3	0,04	12,7	0,6	4,4	70	0,85	0,2	4,4	0,19	0,23	0,5
AC2	13/fev/02	14,5	11,3	6	109	<0,3	<0,005	11,3	0,6	5	70	0,77	0,24	3,7	0,16	0,14	0,51
AC2	15/mai/02	15	12,9	2,7	114	<0,3	<0,005	11,6	0,5	2,9	70	0,85	0,16	4,6	0,26	0,32	0,51
AC2	18/jun/02	17,5	12,1	4,2	109	<0,3	<0,005	13,9	0,3	4,2	75	0,84	0,16	3,2	0,13	0,21	0,53
AC2	23/jul/02	17,4	10,7	6,3	105	<0,3	<0,005	15,9	0,3	6,8	75	0,72	0,24	2,5	<0,1	0,14	0,54
AC2	10/set/09	16	10	5,7	100	<0,3	0,01	16	1,5	9,4	75	0,86	0,25	1,9	<0,1	<0,03	0,65
AC2	07/out/09	15	10	-	-	<0,3	0,01	16	-	-	76	1,4	0,36	2,1	<0,1	-	0,69
AC2	11/nov/09	16	18	6,1	106	<0,3	0,01	15	1,3	5,7	76	1,6	0,33	2,3	<0,1	<0,03	0,66
AC2	09/dez/09	17	20	6,1	106	<0,3	0,01	14	1,3	6,6	77	1,6	0,31	3,9	0,24	0,06	0,65
	Mínimo	14,5	10	2,7	100	<0,3	<0,005	11,3	0,3	2,9	69	0,72	0,16	1,9	<0,1	<0,03	0,48
	Máximo	17,5	20	6,3	120	<0,3	0,04	16	1,5	9,4	77	1,6	0,36	5,6	0,27	0,32	0,69
	Média	16	12,9	5,35	108,5	<0,3	<0,005	13,9	0,6	5	75	0,85	0,24	3,7	0,16	0,13	0,53
	Desv. Padrão	0,97	3,11	1,20	5,12	0,00	0,01	1,77	0,43	1,86	2,98	0,33	0,06	1,12	0,06	0,09	0,08
	CV	0,06	0,24	0,22	0,05	0,00	1,95	0,13	0,71	0,37	0,04	0,39	0,26	0,30	0,40	0,68	0,14

Apesar de as análises terem sido feitas em anos e meses diferentes apresentam valores muito constantes entre si, o que demonstra que o meio se manteve estável durante o decorrer das análises.

Com os resultados das análises químicas foi feita modelação hidrogeoquímica, recorrendo ao *software* PHREEQCi versão 3.1.2 (Parkhurst & Appelo, 2013). Esta modelação foi feita com o intuito de se conhecerem as principais espécies iónicas dissolvidas na água e as suas concentrações, assim como os índices de saturação em alguns minerais. Serviu ainda para verificar se existiria algum erro de balanço iónico na análise efetuada.

Para poder utilizar este *software* houve necessidade introduzir alguns parâmetros físico-químicos, assim como pH, *pe* e temperatura. Para o cálculo de *pe* foi utilizado o valor de Eh obtido em Cõa Rupestre (2009) (-140,5 mV) por ter sido obtido em Outubro de 2009 e estava temporalmente mais próximo que o determinado na campanha de maio de 2015, mas cujo valor tinha a mesma ordem de grandeza. Os valores obtidos para *pe* situam-se entre -2,4 e -2,5.

Embora se tenha efetuado a determinação das espécies dissolvidas recorrendo ao *software* PHREEQCi versão 3.1.2 (Parkhurst & Appelo, 2013) em todas as amostras de água analisadas pelo IST (2001a e b, 2002a-e, 2009a-d) (Tab.12), optou-se por apresentar a modelação que utilizou um valor médio de todas as espécies iónicas assim como dos parâmetros físico-químicos. Esta escolha deveu-se ao facto de os valores obtidos nas análises serem muito constantes ao longo do tempo, podendo por isso assumir-se que as diversas amostras constituem subamostras da mesma população. Para além destes valores foi necessário introduzir as concentrações médias das espécies analisadas. A partir destes fez-se a modelação hidrogeoquímica (Tab.12,13 e 14)

Tabela 12- Descrição de alguns parâmetros físico-químicos da água analisada, em diferentes análises, no furo AC2 (valores obtidos na modelação com o PHREEQCi)

Parâmetros físico-químicos da água	pH	pe	T (°C)	Condutividade elétrica específica calculada ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 18°C)	Força iónica	Carbono total (mol/kg)	Erro de balanço iónico
Nov-01	8,71	-2,4	19	299	$3,806 \times 10^{-3}$	$1,928 \times 10^{-3}$	-2,14
Dez-01	8,96	-2,4	17	276	$3,693 \times 10^{-3}$	$1,928 \times 10^{-3}$	-0,28
Jan-02	8,89	-2,4	18	289	$3,722 \times 10^{-3}$	$1,928 \times 10^{-3}$	0,94
Fev-02	9,00	-2,4	18	280	$3,608 \times 10^{-3}$	$1,953 \times 10^{-3}$	0,38
Mai-02	8,68	-2,5	11	235	$3,654 \times 10^{-3}$	$2,008 \times 10^{-3}$	0,80
Jun-02	8,80	-2,4	19	304	$3,769 \times 10^{-3}$	$1,929 \times 10^{-3}$	0,77
Jul -02	9,12	-2,4	20	315	$3,798 \times 10^{-3}$	$1,887 \times 10^{-3}$	-1,18
Set-09	9,06	-2,4	18	293	$3,680 \times 10^{-3}$	$1,702 \times 10^{-3}$	0,74
Nov-09	9,00	-2,4	18	284	$3,546 \times 10^{-3}$	$1,848 \times 10^{-3}$	4,44
Dez-09	9,07	-2,4	18	312	$4,057 \times 10^{-3}$	$1,820 \times 10^{-3}$	0,71
Valor utilizado	8,96	-2,4	18	299	$3,806 \times 10^{-3}$	$1,877 \times 10^{-3}$	1,29

Com base nos dados obtidos na modelação anterior foi feita uma tabela (Tab.13) com os elementos existentes, a sua concentração total, as principais espécies iónicas de cada elemento e sua molaridade.

Tabela 13- Principais espécies iônicas e suas molaridades obtidas no software PHREEQC

Elementos	Concentração total (mmol/L)	Principais espécies iônicas	Concentração da espécie (mmol/L)
C (4)	1,877	HCO ₃ ⁻	1,778
		CO ₃ ⁻²	8,005 x 10 ⁻²
Ca	9,234 x 10 ⁻²	Ca ⁺²	8,392 x 10 ⁻²
		CaHCO ₃ ⁺	1,310 x 10 ⁻³
Cl	4,514 x 10 ⁻¹	Cl ⁻	4,514 x 10 ⁻¹
F	7,318 x 10 ⁻¹	F ⁻	7,304 x 10 ⁻¹
		MgF ⁺	1,967 x 10 ⁻⁴
Fe (2)	2,304 x 10 ⁻³	Fe ⁺²	8,697 x 10 ⁻⁴
		FeOH ⁺	1,262 x 10 ⁻⁴
		FeHCO ₃ ⁺	1,199 x 10 ⁻⁴
Fe (3)	2,471 x 10 ⁻⁵	Fe (OH) ₄ ⁻	9,929 x 10 ⁻⁶
		Fe (OH) ⁺²	1,773 x 10 ⁻⁷
K	2,174 x 10 ⁻²	K ⁺	2,173 x 10 ⁻²
		KSO ₄ ⁻	1,374 x 10 ⁻⁵
Li	7,640 x 10 ⁻²	Li ⁺	7,637 x 10 ⁻²
		LiSO ₄ ⁻	3,380 x 10 ⁻⁵
Mg	6,583 x 10 ⁻³	Mg ⁺²	5,946 x 10 ⁻³
		MgF ⁺	1,967 x 10 ⁻⁴
N (-3)	1,714 x 10 ⁻²	NH ₄ ⁺	1,314 x 10 ⁻²
		NH ₄ SO ₄ ⁻	1,711 x 10 ⁻⁵
Na	3,263	Na ⁺	3,255
		NaCO ₃ ⁻	2,682 x 10 ⁻³
		NaSO ₄ ⁻	1,583 x 10 ⁻³
S (-2)	1,872 x 10 ⁻²	HS ⁻	1,817 x 10 ⁻²
		S ⁻²	1,540 x 10 ⁻⁶
S (6)	1,343 x 10 ⁻¹	SO ₄ ⁻²	1,315 x 10 ⁻¹
		NaSO ₄ ⁻	1,583 x 10 ⁻³
		LiSO ₄ ⁻	3,380 x 10 ⁻⁵
Si	4,661 x 10 ⁻¹	H ₃ SiO ₄ ⁻	4,755 x 10 ⁻²
		H ₂ SiO ₄ ⁻²	2,302 x 10 ⁻⁶

Tendo como base os valores resultantes das análises químicas na tabela 11 e os obtidos da modelação (Tab.12 a 14) é possível notar o seguinte:

No que respeita aos elementos constituintes maiores (> 5 mg/L) foi possível obter as seguintes conclusões:

HCO₃⁻ e CO₃⁻² - A elevada quantidade de bicarbonato e carbonato existentes na água contribui para que esta tenha um pH alcalino. O carbonato e o bicarbonato

existente nas águas graníticas está geralmente associado ao silicato obtido por intemperismo, hidrólise de silicatos (Matthess & Harvey, 1982).

Na⁺ - O sódio apresenta uma concentração média em águas subterrâneas em contacto com rochas ígneas de 28,1 mg/L (Matthess & Harvey, 1982), sendo por isso um dos principais constituintes. Os valores de sódio obtidos na análise são elevados pois estamos na presença de um granito muito rico em feldspatos perfiticos, com alto teor de sódio e plagioclase. O sódio pode ainda encontrar-se em outras espécies mas estas serão pouco representativas, como é o caso das espécies aniónicas NaCO₃⁻ e NaSO₄⁻ com $2,682 \times 10^{-3}$ e $1,583 \times 10^{-3}$ mmol/L respetivamente.

Cl⁻ - A concentração neste elemento em águas subterrâneas de granitos apresenta de um modo geral valores inferiores a 30 mg/L sendo que estes podem ser aumentados se houver uma contaminação por atividades antropogénicas (efluentes líquidos e resíduos sólidos, assim como do uso de fertilizantes) (Matthess & Harvey, 1982).

F⁻ - Nas águas subterrâneas comuns o flúor encontra-se normalmente em concentrações inferiores a 1 mg/L (Davis & Wiest, 1971). Valores superiores a 3 mg/L são já pouco frequentes e acima de 10 mg/L são raros (Hem, 1985). Em águas de campos geotérmicos é normal o flúor estar em concentrações acima de 1 mg/L, mas só excecionalmente além dos 15 mg/L, sendo que as concentrações normais de fluoreto para uma água sulfúrea alcalina são da ordem dos 10 a 25 mg/L. (Nordstrom & Jenne, 1977; citados em Calado & Almeida, 1993). Calado & Almeida (1993) concluíram que o flúor nestas águas terá uma origem profunda sendo que poderá ser mesocrustal e/ou infracrustal, estando relacionado com processos de levantamento crustal (*uplift*) que afetaram sobretudo o norte e o centro do território, proporcionando manifestações residuais da instalação dos maciços graníticos tardi-hercínicos. Este poderá ainda ter origem na dissolução de fluorite, ou de outros minerais fluoríferos como a fluorapatite, a moscovite e algumas anfíbolas, sendo que neste caso os valores não ultrapassam geralmente 1 mg/L (Matthess & Harvey, 1982). A fluorite também está presente na água sob a forma de MgF⁺ com uma concentração de $1,967 \times 10^{-4}$ mmol/L.

SO₄²⁻ - Este anião apresenta valores relativamente altos; a sua existência poderá estar associada a oxidação de sulfuretos existentes nos filões de quartzo ricos em sulfuretos (por exemplo, pirite, calcopirite e arsenopirite), (Custodio & Llamas, 2001). Na amostra também pode encontrar-se em várias espécies aniónicas como é o caso de KSO₄⁻, LiSO₄⁻, NH₄SO₄⁻, NaSO₄⁻, apresentando valores de $1,374 \times 10^{-5}$, $3,380 \times 10^{-5}$, $1,711 \times 10^{-5}$ e $1,583 \times 10^{-3}$ respetivamente.

Para as espécies constituintes menores (0,01 a 5 mg/L) foi possível obter as seguintes conclusões:

H₃SiO₄⁻ - O ácido silícico aparece na sua forma ionizada pois é este o seu estado mais comum na água. Este ácido tem origem sobretudo na dissolução de quartzo (Matthess & Harvey, 1982).

Ca²⁺ - Os valores de cálcio medidos são relativamente baixos devido ao facto das rochas graníticas serem pobres em feldspatos cálcicos, sendo também possível dissolvê-lo a partir da fluorite, mas em muito pequenas quantidades. A principal fonte de cálcio são os carbonatos, sendo que este pode ainda ser adicionado à água subterrânea através da precipitação atmosférica, mas em pequenas quantidades (Matthess & Harvey, 1982). O cálcio pode ainda ser encontrado na amostra na espécie CaHCO_3^+ com uma concentração de $1,310 \times 10^{-3}$ mmol/L.

K⁺ - Os valores médios de potássio existente na água ronda 25,7 mg/L (Matthess & Harvey, 1982). Os valores analisados são baixos (0,76 a 1,6 mg/L). O potássio terá a sua fonte principal a partir dos carbonatos existentes na zona, sendo que podem ainda ter origem em fertilizantes agrícolas (Matthess & Harvey, 1982), mas como o valor se apresenta baixo tal não deve ocorrer neste caso. O potássio também se pode encontrar na amostra na espécie aniónica KSO_4^- com uma concentração de $1,374 \times 10^{-5}$ mmol/L.

HS⁻ - No hidrogenossulfureto (espécie iónica), o enxofre está no seu estado mais reduzido, o que não é frequente em águas de maciços graníticos. No mesmo estado encontra-se o enxofre do gás sulfídrico (H_2S). Nesta água a espécie iónica (HS^-) domina (devido ao seu elevado pH) em relação à espécie gasosa (H_2S). No entanto, o (H_2S) está presente (embora em muito baixas concentrações), como facilmente se reconhece a partir do seu odor característico (Lima, 2011).

Sobre a origem natural do enxofre reduzido nas águas sulfúreas, Calado (2001) apresenta as seguintes quatro hipóteses: (1) Redução de sulfatos; (2) dissolução de sulfuretos; (3) fusão de piritite em profundidade; (4) ascensão de gás sulfídrico a partir do manto.

Li⁺ - Os valores de lítio são tidos como normais para uma água subterrânea pois apresenta valores médios entre 0,001 e 0,5 mg/L. Este está associado com a substituição de magnésio e apresenta uma concentração relativamente alta em pegmatitos (Matthess & Harvey, 1982). O lítio também aparece na espécie LiSO_4^- com uma concentração de $3,380 \times 10^{-5}$ mmol/L.

NO₃⁻ e NO₂⁻ - Estas espécies podem ter origem da nitrificação natural (bactérias nitrificantes), por exemplo na raiz das leguminosas. Outro fator nitrificante mas neste caso antropogénico pode ter a ver com a decomposição da matéria orgânica e da contaminação urbana, industrial, pecuária e agrícola. Quando a água tem menos que 10 ppm considera-se que o seu conteúdo é baixo, mas nas águas subterrâneas não contaminadas é muito raro superar uns poucos ppm (Custodio & Llamas, 2001).

NH₄⁺ - Os valores de amónia normais em águas subterrâneas e superficiais rondam os 0,2 mg/L, sendo que existem águas subterrâneas em processo anaeróbio em que pode chegar aos 3 mg/L. A amónia tem origem sobretudo na decomposição da matéria orgânica, contudo quando esta concentração é elevada a sua origem deverá ser antropogénica, devido à poluição quer industrial quer doméstica (Dias, 2008).

Mg²⁺ - O ião magnésio pode estar associado à dissolução de silicatos magnesianos e ferromagnesianos, como por exemplo, piroxenas, anfíbolos, micas e material

argiloso (Custodio & Llamas, 2001). Na amostra o magnésio encontra-se associado na espécie aniónica MgF^+ com uma concentração de $1,967 \times 10^{-4}$ mmol/L.

Fe²⁺ - O ião ferro procede sobretudo da dissolução óxidos de ferro, de silicatos ferromagnesianos e de sulfuretos (por exemplo: piroxenas, anfíbolos, biotite, magnetite e pirite). A solubilidade depende fundamentalmente do potencial de oxidação existente, sendo que o ferro se dissolve e precipita com facilidade. Quando em meios oxidantes o ferro apenas apresenta uma quantidade mínima dissolvida (Custodio & Llamas, 2001). O ião Fe^{2+} pode ser encontrado nas espécies $FeOH^+$ e $FeHCO_3^+$, com as respetivas concentrações $1,262 \times 10^{-4}$ e $1,199 \times 10^{-4}$ mmol/L.

Os valores em mg/L das concentrações em constituintes principais expressos nas análises do IST foram recalculados para $\mu eq/L$ de forma a projetar as amostras no diagrama de Piper (Fig.35).

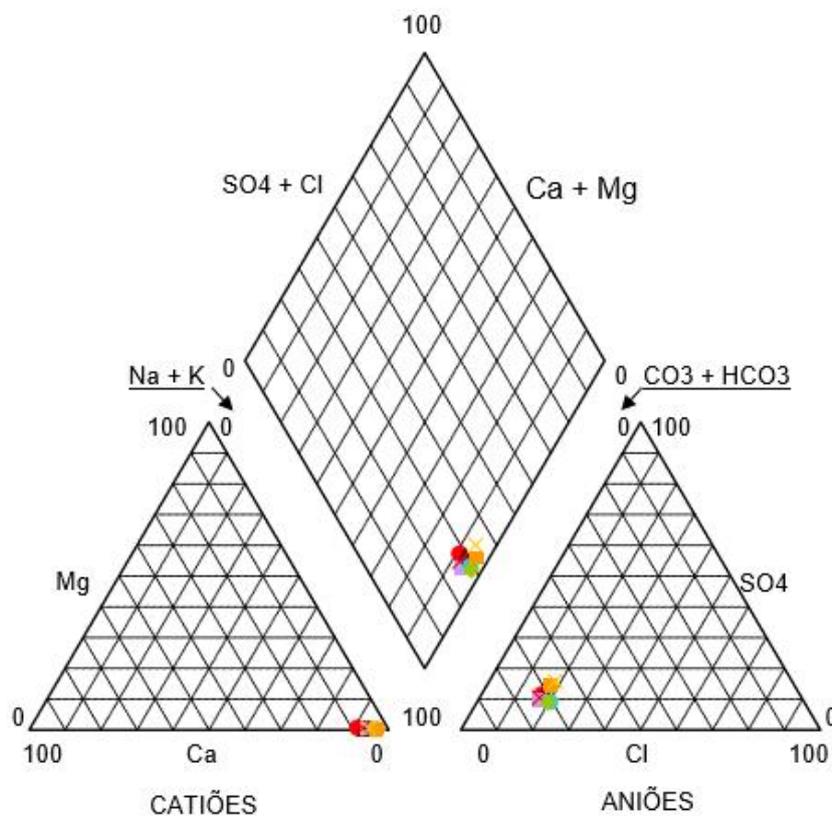


Figura 35- Diagrama de Piper, com a classificação da água das Termas da Touca nas diferentes análises.

No diagrama de Piper é notória a mancha criada pelas diferentes análises, o que não deixa de ser normal devido ao facto destas serem no geral muito semelhantes.

A água é classificada no diagrama em cima, como bicarbonatada sódica. O IST caracteriza estas águas nas suas análises, como sendo fracamente mineralizada, com reação alcalina e macia, dizendo ainda que é uma água sulfúrea e fluoretada. Esta classificação é feita de acordo com as normas do Instituto de Hidrologia de Lisboa.

A considerável constância e estabilidade da assinatura hidroquímica das sucessivas amostras pode estar associada ao fato de: (1) O ciclo ser muito longo e demorado o que fará com que a água seja relativamente constante durante mais tempo; (2) A água captada encontra-se relativamente profunda, o que aliado ao facto de esta não estar em contacto com o ar, faz com que quase não sofra alterações químicas exteriores; (3) Outro fator importante será que a litologia seja bastante homogênea durante todo o seu ciclo (até à zona de descarga nas Termas), o que tem grande importância para preservar a sua constituição hidrogeoquímica.

Da modelação feita no software PHREEQCi, foi ainda possível construir uma tabela (Tab.14) com os índices de saturação da água em diversas fases minerais e gasosas. A água pode estar subsaturada caso o índice de saturação seja inferior a zero, sobressaturada se superior a zero e em equilíbrio caso seja igual a zero (Oliveira, 2011). Neste caso os valores entre -0,1 e 0,1 foram considerados como estando em equilíbrio.

Tabela 14 – Índices de saturação da água nas diferentes fases minerais.

Índices de saturação				
Fase	IS	log IAP	log K(291 K, 1 atm)	Formula química
Anidrite	-3,98	-8,18	-4,21	CaSO ₄
Aragonite	-0,1	-8,4	-8,3	CaCO ₃
Calcite	0,05	-8,4	-8,45	CaCO ₃
Calcedónia	0,25	-3,38	-3,63	SiO ₂
Crisolite	-2,03	30,99	33,02	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ⁴
CO ₂ (g)	-3,96	-5,35	-1,38	CO ₂
Dolomite	-1,01	-17,94	-16,94	CaMg (CO ₃) ²
Fe (OH) ₃ (a)	0,24	5,13	4,89	Fe (OH) ³
FeS (ppt)	1,93	-1,98	-3,92	FeS
Fluorite	0,16	-10,52	-10,68	CaF ₂
Goethite	5,89	5,13	-0,76	FeOOH
Gesso	-3,6	-8,18	-4,58	CaSO ₄ :2H ₂ O
H ₂ (g)	-13,16	-16,24	-3,08	H ₂
H ₂ O(g)	-1,67	0	1,67	H ₂ O
H ₂ S(g)	-5,72	-13,73	-8,01	H ₂ S
Halite	-7,45	-5,89	1,56	NaCl
Hematite	13,76	10,26	-3,5	Fe ₂ O ₃
Jarosite-K	-15,47	-24,17	-8,7	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ⁶
Mackinawite	2,67	-1,98	-4,65	FeS
Melanterite	-7,88	-10,17	-2,29	FeSO ₄ :7H ₂ O
NH ₃ (g)	-7,33	-5,4	1,94	NH ₃
O ₂ (g)	-59,2	-62,04	-2,84	O ₂
Pirite	16,07	-2,59	-18,66	FeS ₂
Quartzo	0,7	-3,38	-4,08	SiO ₂
Sepiolite	-0,9	15,03	15,93	Mg ₂ Si ₃ O ₇ .5OH:3H ₂ O
Sepiolite (d)	-3,63	15,03	18,66	Mg ₂ Si ₃ O ₇ .5OH:3H ₂ O
Siderite	0,47	-10,38	-10,85	FeCO ₃
SiO ₂ (a)	-0,61	-3,38	-2,77	SiO ₂
Enxofre	1,38	6,42	5,04	S
Silvite	-8,93	-8,07	0,87	KCl
Talco	2,08	24,24	22,16	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ²

A água esta subsaturada em anidrite, calcedónia, crisolite, dolomite, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (amorfo), gesso, halite, jarosite, melanterite, sepiolite, sepiolite (d), sílica amorfa (SiO_2 (a)) e silvite. Os minerais em que a água está sobressaturada são o FeS, fluorite, goethite, hematite, quartzo, pirite, siderite, enxofre e talco. Por outro lado, os minerais em equilíbrio na água são a aragonite e a calcite. A água encontra-se subsaturada em todos os gases, sendo eles CO_2 , H_2 , H_2O , H_2S , NH_3 , O_2 .

A subsaturação da água num dado mineral poderá querer dizer que caso esta estivesse em contacto com algum meio onde houvesse esse mineral a água poderia dissolvê-lo para integrar os seus elementos móveis na sua composição.

A água está assim sobressaturada em óxidos, hidróxidos, carbonatos e sulfuretos de ferro, assim como em fluorite, enxofre, talco e quartzo. Neste caso, os minerais que podem ser precipitados a partir da água, mesmo que numa primeira fase, em águas frias, precipitem sob a forma amorfa, correspondem a óxidos e hidróxidos, carbonatos e sulfuretos de ferro, o que pode justificar a cor avermelhada das incrustações visíveis ao longo de algumas fraturas.

4.2.4- Índices hidrogeoquímicos

As razões iónicas de uma água podem ser de grande utilidade na deteção da sua procedência, uma vez que se relacionam com a natureza das rochas pelas quais circula, ou então, darem indicação acerca da ação de fenómenos modificadores por via de reações de interação água-rocha, entre outras. São, portanto, capazes de ajudar a identificar os processos a que uma água se submeteu no decurso do seu trajeto subterrâneo (Morais, 2012).

Na tabela 15 estão, segundo Hem (1985), apresentados os valores de alguns dos índices hidrogeoquímicos mais usados, assim como os intervalos de variação e respetivo significado.

Tabela 15- Índices hidrogeoquímicos, intervalos de variação e seu significado, extraídos de Hem (1985).

Índices	Valor teórico	Origem provável (interpretação)
rMg/rCa	0,25-0,33	Água de circulação por rocha de composição granítica
	0,3-1,5	Águas continentais
	±1	Influência de terrenos dolomíticos
	>1	Fluxo através de rochas básicas ricas em silicatos de Mg
	±5	Água do mar
rK/rNa	0,02-0,025	Água do mar
	0,09-0,6	Água de circulação por rocha de composição granítica
	0,004-0,28	Águas doces
rNa/rCl	<0,088	Água do mar / troca do Na ⁺ por Ca ²⁺ e Mg ²⁺
	<0,7	Precipitação de sais de Na
	>0,7	Circulação por rochas cristalinas ou vulcânicas
rCl/rHCO ₃	0,5	Circulação por rochas cristalinas
	0,1-0,5	Águas continentais
	20-50	Água do mar

Para além dos índices apresentados na tabela anterior foram ainda utilizados alguns índices hidrogeoquímicos utilizados pelo programa AquaChem (v.4.0) para a caracterização da água (Tab.16).

Tabela 16 - Índices hidroquímicos calculados pelo software AquaChem (v.4.0) (segundo Oliveira, 2011).

Índices	Valor teórico	Origem provável (Interpretação)
SiO ₂ (mmol/l)	> 0,5	Vidro Vulcânico ou possibilidade da presença de água hidrotermal
HCO ₃ ⁻ /SiO ₂	>10	Alteração de Carbonatos
	>5 e <10	Ambíguo
	<5	Alteração de Silicatos
SiO ₂ /(Na+K-Cl)	<1	Troca catiónica
	>1 e <2	Alteração da Albite
	>2	Minerais ferromagnesianos
Cl/Somatório de aniões	>0,8 e TDS>500	Água do mar, salmoura ou evaporitos
	>0,8 e TDS<100	Água da chuva
	<0,8	Alteração de rochas

A partir das análises químicas foi possível determinar as razões existentes e determinar os principais índices hidroquímicos. Na tabela 17 apresentam-se os valores mínimo-máximo e a média das razões utilizadas, a interpretação dos valores obtidos e ainda o coeficiente de correlação de Pearson. Este coeficiente mede o grau da correlação linear entre duas variáveis de uma escala métrica (intervalar ou de rácio/razão) e a direção dessa correlação, será positivo ou negativo conforme a proporção seja direta ou inversa, respetivamente.

Tabela 17 – Valores obtidos das razões apresentadas assim como o valor de coeficiente da correlação de Pearson. “r=meq”

Índices	Mínimo	Máximo	Média	Interpretação	Coeficiente de Pearson
rMg/rCa	0,066	0,102	0,079	Água de circulação por rocha de composição granítica	0,932
rK/rNa	0,006	0,012	0,007	Água de circulação por rocha de composição granítica	0,673
rNa/rCl	6,608	7,813	7,148	Circulação por rochas cristalinas	0,546
rCl/rHCO ₃	0,226	0,285	0,254	Águas continentais	-0,257
SiO ₂ (mmol/l)	0,409	0,682	0,449	0,5> Possibilidade da presença de água hidrotermal	-----
HCO ₃ ⁻ /SiO ₂ (ppm)	2,439	4,472	4,115	Alteração de Silicatos	-0,554
SiO ₂ /(Na+K-Cl) (ppm)	0,439	0,685	0,455	Troca catiónica	0,531
Cl ⁻ /Somatório de aniões (ppm)	0,092	0,363	0,098	Alteração de rochas	0,439

Como descrito na tabela 17, é possível observar que alguns dos índices calculados (rMg/rCa, rK/rNa e rNa/rCl, todos em meq) têm valores tais que a sua interpretação segundo Hem (1985) caracteriza estes como sendo águas de circulação por rocha de composição granítica. O valor da razão HCO₃⁻ /SiO₂, é interpretado como tendo origem na alteração de silicatos, a razão SiO₂/(Na+K-Cl) demonstra que tenha havido troca catiónica, enquanto o valor da razão Cl⁻ /Somatório de aniões é normal para quando há alteração das rochas. O valor de SiO₂ está muito próximo de 0,5 pelo que se poderá dizer que esta água poderá ter sofrido algum tipo de mistura com outra água subterrânea. Os valores obtidos dos índices mencionados, mostram que esta água tem valores típicos para uma água de circulação em rochas ígneas de natureza granítica e onde também existiu alterações de silicatos e na rocha, para além de troca iónica.

No que se refere a interpretação dos valores do coeficiente de Pearson, a classificação pode ser feita tendo em conta Dancey e Reidy (2005) (retirado de Filho & Júnior, 2009), que classificam este coeficiente segundo os seguintes intervalos: r = 0,10 até 0,30 (fraco); r = 0,40 até 0,6 (moderado); r = 0,70 até 1 (forte).

Os valores do coeficiente de Pearson obtidos classificam-se então como sendo de correlação fraca, no índice rCl/rHCO₃, correlação média nos índices rNa/rCl,

$\text{SiO}_2/(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})$, $\text{Cl}^- / \text{Somatório de aniões}$ e $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2$ sendo que esta última tem uma correlação negativa, sendo que ainda existe uma forte correlação positiva em $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ e $r\text{K}/r\text{Na}$.

A correlação forte da relação $r\text{K}/r\text{Na}$ é facilmente explicada em granitos devido ao facto de resultarem sobretudo da alteração das plagioclases sódicas e dos feldspatos (Appelo & Postma, 2005)

A relação $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ permite estudar a evolução da concentração de sais nas águas subterrâneas ao longo do seu percurso. Esta relação é essencialmente útil para caracterização da intrusão marinha (Paralta *et al.*, 2009).

O valor da relação $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ depende em grande parte da duração do contacto da água com o terreno. Valores próximos de zero apontam normalmente para águas de circulação em granitos (Paralta *et al.*, 2009).

A relação $\text{Cl}^- / \text{Somatório de aniões}$ mostra que existe uma maior existência aniões de outro tipo, principalmente de bicarbonato. Sendo que esta assim como toda a mineralização em geral aumenta conforme o seu tempo de residência o que fará com que a correlação de Pearson razão pela qual a correlação de Pearson é positiva e média.

A relação $\text{SiO}_2/(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})$ terá sobretudo a ver com a alteração de feldspatos devido ao facto de o ião cloreto ser subtraído ao de sódio. Neste caso existe uma maior quantidade de $(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})$, o que indica que a origem destes não terá apenas a ver com a alteração de feldspatos, como também das trocas iónicas.

O valor negativo do coeficiente de Pearson no índice $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2$ está relacionado com o facto de devido ao tempo de residência relativamente alto da água em rochas graníticas esta terá tendência em aumentar o valor de SiO_2 e de perder HCO_3^- .

Uma alta relação $r\text{Na}/r\text{Cl}$, sugere uma contribuição limitada da precipitação atmosférica e revela que estes são derivados muito provavelmente pelo intemperismo da rocha, pela troca iónica de minerais e ainda por fontes antropogénicas.

4.2.5- Geotermómetros

A avaliação da temperatura de base da água mineroterma no aquífero, ou seja, a temperatura máxima alcançada pela água no circuito hidráulico, é matéria da maior importância no estudo dos processos hidrotermais. Uma das aproximações usadas na estimativa dessa temperatura tem como referência a composição química da água, obtida em nascentes e furos e baseia-se na premissa fundamental de aquela refletir o estabelecimento de equilíbrios, em profundidade, em reações químicas de interação água-rocha que sejam fortemente dependentes da temperatura (Morais, 2012).

Um geotermómetro é um modelo matemático que relaciona a temperatura do reservatório com a composição química dos fluidos que afloram de maneira natural

ou por meio de poços à superfície. Entre os geotermômetros mais utilizados encontram-se os de SiO₂, Na/K, Na-K-Ca, Na/Li, K-Mg. (Sevilla, 2011).

Segundo Custodio & Llamas (2001), em sistemas aquosos o geotermômetro de sílica é o melhor indicador de temperaturas para temperaturas inferiores a 200 °C, pois este para uma maior temperatura dá indicações errôneas já que a sílica pode precipitar-se parcialmente. A relação Na/K também é útil em sistemas aquosos se a relação se mantém entre os 20 e os 8. A margem de temperaturas para qual esta é útil situa-se entre os 160 °C e os 300 °C. A relação Na/K dá bons resultados para temperaturas maiores do que 200 °C que é quando a SiO₂ começa a dar resultados deficientes.

Segundo Nicholson (1993, citado em Morais 2012), o teor em K/Mg pode representar condições de equilíbrio atingido pela água em reações ocorridas na fase final, mais superficial dos circuitos.

Como não se satisfazem os “requisitos” (sobretudo devido às temperaturas serem inferiores as necessárias para utilizar certos geotermômetros) necessários para a aplicação de alguns geotermômetros, optou-se por não se apresentarem valores obtidos em diversas equações, entre elas as dos geotermômetros de Mg/Li e Na/K.

Deste modo o cálculo das estimativas da temperatura do reservatório da água foi efetuado através de fórmulas experimentais (Fournier, 1981 e 1991), e também de algumas fórmulas empíricas (Arnórsson, 1983 e Giggenbach, 1988) (Tab.18).

Tabela 18 - Valores médios para cada geotermômetro utilizado e respectivos autores dos geotermômetros.

Geotermômetros	Equações de referência em ppm	Valor médio calculado
Quartzo (condutivo)	Fournier (1981, 1991)	97,22 °C
Quartzo (adiabático)	Fournier (1981, 1991)	98,59 °C
Calcedónia	Fournier (1981, 1991)	66,96 °C
Calcedónia (condutivo)	Arnórsson (1983)	68,55 °C
Calcedónia (adiabático)	Arnórsson (1983)	72,75 °C
K/Mg	Giggenbach (1988)	60,05 °C

Verifica-se uma crescente solubilidade dos polimorfos de sílica para temperaturas cada vez mais elevadas, mas existe igualmente um incremento da solubilidade para valores de pH acima de 8 (Nicholson, 1993; Fournier, 1981; citados em Morais, 2012). Assim, para diminuir este efeito utilizaram-se os valores de sílica corrigidos, retirando a concentração da fração ionizada à sílica total e utilizando apenas a espécie H₄SiO₄ no cálculo da temperatura do reservatório. Morais (2012) considera,

no entanto, que a diferença entre as temperaturas estimadas a partir dos dados de sílica corrigida e não corrigida diferem em menos de 5%. A concentração da espécie H_4SiO_4 foi determinada através dos dados obtidos anteriormente pelo software PHREEQCi.

Os geotermómetros da sílica que foram aplicados aos dados das análises, do IST, da água do furo AC2, sugerem que a temperatura de base se situa entre os 97,22 °C e os 98,59 °C, para os calibrados de quartzo, sendo que para os de calcedónia os valores da temperatura variam entre os 66,95 °C e os 72,75 °C, o que mostra que entre estes existe uma diferença entre os 23 e os 30 °C.

Segundo Morais (2012), para esta gama de temperaturas não há afastamento significativo dos valores obtidos por aplicação das funções termométricas que contemplam um arrefecimento adiabático ou condutivo do fluido, sendo contudo, mais plausível admitir para o sistema hidrotermal estudado, que a transferência da água para a superfície tenha sido realizada sob a forma líquida, ocorrendo apenas o arrefecimento condutivo do fluido.

Em alguns geotermómetros calculados (sílica amorfa, por exemplo), os valores da temperatura eram negativos o que traduz a inaplicabilidade do geotermómetro baseado na sílica amorfa para inferir a temperatura em profundidade de águas minerais, sendo que estes acabaram por não ser apresentados.

Os valores obtidos pela relação K/Mg através da fórmula de Giggenbach (1988) apresentam valores mais próximos do dos geotermómetros de sílica, contudo esta temperatura é 6 a 12 °C inferior à obtida pelo geotermómetro de calcedónia.

Tendo como base os valores das temperaturas representados na tabela 18, para as diversas equações, tentou-se determinar a profundidade, em metros, a que o reservatório desta água mineroterma se poderá encontrar. Para este efeito teve-se em consideração que a temperatura da água emergente (18,2 e 18,5 °C) sendo que se utilizou o valor mais baixo (18,2). A temperatura medida nos primeiros quilómetros aumenta com a profundidade seguindo uma progressão média de 3 °C a cada 100 metros de profundidade (ICGC, 2015). Sabendo que a temperatura com os diferentes geotermómetros na tabela 18 varia aproximadamente entre os 60 e os 99 °C, podemos calcular a profundidade do reservatório utilizando:

$$P_r = \frac{(T_{geo} - T_{ma})}{G_{geo}}$$

onde P_r corresponde à profundidade do reservatório (m), T_{geo} corresponde à temperatura obtida com os geotermómetros (°C), T_{ma} é o valor da temperatura da água emergente (°C) e G_{geo} é o gradiente geotérmico (°C / m).

Deste modo, o valor da profundidade do reservatório obtido a partir da temperatura de 60 °C foi de 1393 m, enquanto para o valor de 99 °C foi de cerca de 2693 m. Pelo que se poderá dizer que a profundidade deverá, no mínimo, estar compreendida entre estes valores.

4.3- Modelo Hidrogeológico Conceptual

Qualquer modelo, conceptual ou numérico, consiste numa simplificação de um sistema real que se conhece apenas pontualmente através de um número limitado de dados (Custódio & Llamas, 1976; Gomes, 2012). A conceção de um modelo que enquadre o funcionamento global de um qualquer sistema aquífero só é viável e aceitável se integrar todos os dados relativos à geologia, à hidrodinâmica e à hidroquímica (Gomes, 2012; Marques da Silva, 2000;2009, citado em Correia, 2014).

A proposta para o modelo conceptual aqui apresentado (gráfica e descritivamente) baseia-se nas diversas informações apresentadas anteriormente, sendo que englobam principalmente os elementos geomorfológicos, topográficos, geológicos, geofísicos, e, obviamente de natureza hidrodinâmica e hidroquímica.

Na zona estudada e de uma forma simplificada considerou-se que existem duas grandes unidades aquíferas, sendo elas o aquífero superior (freático) e o aquífero profundo (minerotermal). Estas unidades, de uma forma sintética, apresentam as seguintes características (Tab.19 e 20) e um modelo hidrológico (Fig.37).

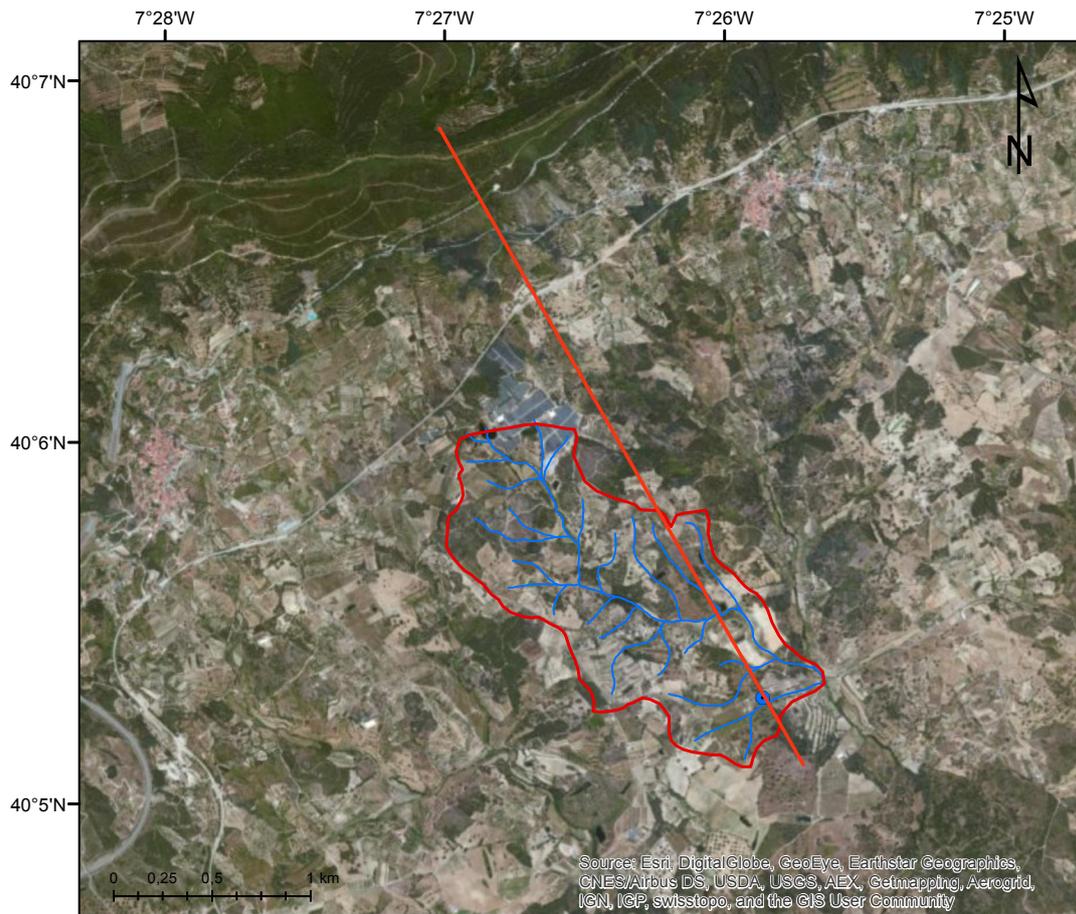
Tabela 19- Características hidrogeológicas do aquífero superior freático.

Característica/parâmetro	Aquífero
Litologia	Granito: alterado (saibrento) ou alterado+densamente fraturado
Geometria/dimensão	Morfologia: estratiforme horizontal, acompanhado aproximadamente a topografia Espessura: variável cerca de 20m nas proximidades das Termas da Touca (ACavaco, 2000)
Meio aquífero	Não-confinado poroso e poroso+fraturado (porosidade dupla)
Porosidades (n e ne)	n = 5 a 20% ne = 5 a 15% (adaptado de Domenico e Schwartz, 1990)
Condutividade hidráulica (K)	3×10^{-4} a 5×10^{-3} cm/s, (adaptado de Domenico e Schwartz, 1990).
Nível hidrostático (profundidade)	0,5 a 4 m no mês de fevereiro), 1 e 6,2 m no mês de maio - Este valor pode oscilar consoante: - O mês do ano em que se fazem as medições e - A evolução anual da precipitação
Circulação hídrica subterrânea (intra-aquífera)	- Sentido geral de NW para SE, - Localmente apresenta variações (sentido W para E e SW para NE no setor sul da ribeira do Ameal).
Recarga aquífera	Principal: decorrente da precipitação atmosférica que se infiltra ao longo de toda a superfície da micro-bacia; - Por transferência de água a partir das linhas de água
Descarga aquífera	- Processos naturais: descarga para as linhas de água e para as exurgências e "minas de água"; drenância para unidades aquíferas profundas e evapotranspiração. - Induzidos: captação em poços e charcas
Hidro(geo)química	Devido à inexistência de análises químicas, apenas se pode afirmar que, tendo em conta os valores da condutividade elétrica (50 a 150 μ S/cm), com pH ácido a neutro e <i>pe</i> /pH próprio de águas em contacto com a atmosfera.

Tabela 20 – Características hidrogeológicas do aquífero profundo.

Característica/parâmetro	Aquífero
Litologia	Rocha granítica sã e fraturada
Tipo de meio aquífero	Confinado a semi-confinado fissural
Porosidades (n e ne)	n = 1 a 10% ne = 0,5 a 5% (adaptado de Domenico e Schwartz, 1990)
Condutividade hidráulica (K)	8×10^{-7} a 3×10^{-2} cm/s (adaptado de Domenico e Schwartz, 1990).
Nível hidrostático (profundidade)	No furo AC1 o nível hidrostático situava-se a 2,1 m, no AC2 a profundidade era algo menor, 1,7m (Acavaco, 2000).
Recarga aquífera e circulação hídrica subterrânea (ver Fig.2)	De acordo com os escassos elementos atuais estima-se que: - A recarga aquífera resulte da infiltração nos domínios mais elevados da Serra da Gardunha, situados a NW das Termas da Touca - A circulação subterrânea evolua de NW para SE.
Descarga aquífera	Processos naturais: artesianismo para domínios superiores e para a superfície (por exemplo, para o antigo poço das Termas). Processos induzidos: captação em furos
Hidro(geo)química	Natureza alcalina (pH próximo dos 9) e termal (temperatura próximo dos 18 °C); Mineralização fraca (resíduo seco de 203 a 225 mg/L); Água fluoretada e sulfúrea (IST), com <i>facies</i> bicarbonatada sódica.; Principais espécies (aniónicas ou catiónicas) dissolvidas: Na ⁺ , HCO ₃ ⁻ , F ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , Ca ⁺² , CO ₃ ⁻² , Li ⁺ , H ₃ SiO ₄ ⁻ , K ⁺ , HS ⁻ . Saturada em: Pirite, Goethite, Hematite, Enxofre, Calcedónia, Siderite e Fluorite. Encontra-se em equilíbrio com a aragonite e calcite. A temperatura de reservatório (origem) varia entre 60 e 99 °C. Profundidade provável do reservatório varia entre 1393 e 2693 m.

Tendo em consideração os elementos acima descritos, traçou-se um perfil conceptual explicativo da hidrogeologia (hidrodinâmica) na zona em estudo (Fig.37). O perfil determinado apresenta uma orientação NW-SE, este ultrapassa o limite do domínio estudado (Fig.36) uma vez que se pretendeu incluir setores, NW, mais elevados da Serra da Gardunha, sendo que estes têm grande importância na recarga aquífera da região e provavelmente no aquífero minerotermal também.



Legenda

- Perfil NW-SE
- Linhas de água
- Micro-bacia ribeirão Ameal

Figura 36 – Mapa com a localização do perfil utilizado para o modelo conceptual enquadrado na micro-bacia, criado com o software ArcGis 10.3.1, com imagem ESRI de base.

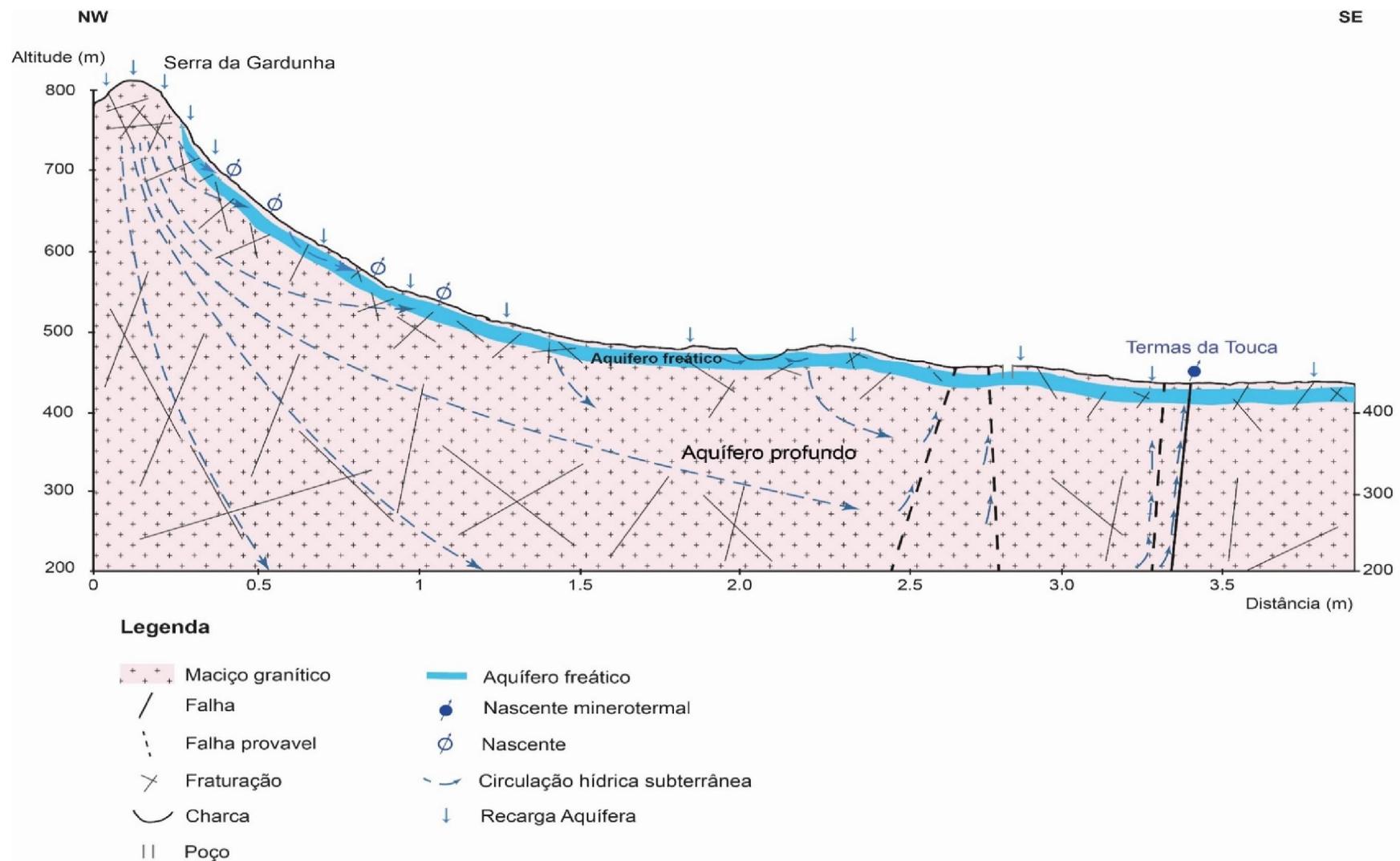


Figura 37 – Modelo hidrogeológico conceptual, nas envolventes das Termas da Touca, com o perfil NW-SE determinado, criado com o software Adobe Illustrator CC 2015, com base em dados referidos em capítulos anteriores.

5- Conclusões e Recomendações

5.1- Conclusões

A área estudada – mb RA – corresponde a uma micro-bacia do setor NW da vasta bacia do rio Ponsul; esta é por sua vez uma das sub-bacias do rio Tejo.

Esta micro-bacia é constituída na sua totalidade por granitos monzonítico porfiroides de grão médio a grosseiro, que se formaram aquando da orogenia Varisca numa fase mais tardia, sendo, por isso, denominados tardi-pós-Variscos, motivo pelo qual comumente se lhe chamam “granitos *Younger*”. Estes granitos têm uma composição calco-alcalina, porfiroide de duas micas essencialmente biotite que aparecem muitas vezes oxidadas o que dá origem à cor amarelada dos afloramentos.

A fracturação está geralmente ligada a um sistema de falhas muito profundo e com relativa extensão, que provavelmente foi rejogado mais recentemente. Contudo, verifica-se que é nas falhas mais pequenas, geralmente transversais às falhas principais (como se pode ver no mapa tectónico), que a água ascende à superfície nos circuitos hidrominerotermais.

Na mb RA identificaram-se 4 famílias de fraturas. A família principal (mais regional) tem uma orientação N60-70°E, sendo que as falhas transversais onde emerge a água mineraloterma têm uma orientação N10-20°W, e as outras duas famílias têm orientação N40-50°W e N30-40°E. Estas famílias têm paralelismo na fraturação regional da Zona Centro-Ibérica.

Na mb-RA estudaram-se dois tipos de aquíferos, um deles correspondente ao aquífero freático (não-confinado) de natureza porosa e porosa-fissurada e o segundo corresponde ao aquífero profundo confinado a semi-confinado e do tipo fissural.

A caracterização físico-química das águas dos dois aquíferos, realizadas *in situ* evidenciou:

- A água existente no aquífero freático apresenta importante proximidade físico-química com a água da chuva, apresenta uma temperatura média relativamente baixa (12,6 °C), uma condutividade elétrica baixa (50 a 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$) decorrente de uma baixa mineralização e de um baixo tempo de residência, um pH ácido (5,0 a 6,7) e um Eh elevado (540 a 650 mV).
- A água existente no aquífero profundo do tipo fissural apresenta uma temperatura de emergência que ronda os 18 °C, o pH tem um carácter alcalino sendo superior a 8,68 (valor mínimo existente), tem uma condutividade elétrica mais elevada (374 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dada a sua maior mineralização e tempo de residência, e um valor de Eh negativo (-102 mV).

A sua mineralização é muito constante ao longo das análises feitas, sendo uma água fracamente mineralizada, pois resíduo seco varia de 203 a 225 mg/L.

A água captada no aquífero profundo fissural, no furo AC2, é considerada mineraloterma e classificada como bicarbonatada sódica, sulfúrea e fluoretada com

reação alcalina e macia. As espécies aniônicas e catiônicas com maior concentração são Na^+ , HCO_3^- , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{+2} , CO_3^{2-} , Li^+ , H_3SiO_4^- , K^+ e HS^- . Esta encontra-se saturada em óxidos, hidróxidos, carbonatos e sulfuretos de ferro, em enxofre, quartzo e fluorite. A água está num ambiente claramente redutor onde o valor de Eh e *pe* são negativos. Segundo o diagrama *pe/pH* a água mineroterma projeta-se numa zona correspondente a águas subterrâneas e está junto ao limite das águas em “ambiente isolado de atmosfera”, o que explica a manutenção de espécies de enxofre reduzidas, como HS^- e S^{2-} .

Os valores obtidos para os índices hidrogeoquímicos $r\text{Mg}/r\text{Ca}$, $r\text{K}/r\text{Na}$ e $r\text{Na}/r\text{Cl}$, $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$, entre outros, mostram que esta água apresenta valores típicos de uma água de circulação em rochas graníticas, de circulação profunda e com um tempo de residência elevado, onde ocorrem trocas iônicas e a alteração da rocha mãe, para a obtenção de silicatos.

Para o cálculo dos geotermómetros de sílica utilizou-se a concentração da espécie H_4SiO_4 , enquanto para o geotermómetro de K/Mg utilizou-se as concentrações que lhes são correspondentes. Deste modo obtiveram-se valores entre 60 e 99 °C. Com base em valores da temperatura da água emergente (18,2 °C) e do gradiente geotérmico (3 °C/ 100 m) obteve-se uma profundidade do reservatório entre 1393 e 2693 m.

5.2- Recomendações

As massas de água subterrânea em análise na presente dissertação constituem importantes recursos naturais para as atividades antrópicas locais e regionais. No entanto, a estabilidade e sustentabilidade destes recursos hídricos, quer a nível quantitativo, quer qualitativo, podem estar ameaçadas por variações nos parâmetros ambientais e pelas atividades antropogénicas locais.

No conjunto dos riscos que ameaçam a sustentabilidade das massas de água freáticas destacam-se:

a) Fatores e processos naturais

- Períodos de seca de maior durabilidade;
- Contaminação da água por fatores naturais.

b) Atividades e estruturas antrópicas

- Uso excessivo de pesticidas, fertilizantes e estrume sobretudo.
- Exploração não controlada de poços e outras massas de água.
- Atividades industriais sem controlo de efluentes.
- Existência de fossas sépticas sem a devida impermeabilização.

No conjunto dos riscos que ameaçam a sustentabilidade da massa de água profunda de natureza mineroterma relevam-se:

a) Fatores e processos naturais

- Todos os processos de alterações climáticas que afetem as águas superficiais, a longo prazo (centenas ou milhares de anos), pois as massas de água profundas são recarregadas por massas de água mais subsuperficiais.

b) Atividades e estruturas antrópicas

- Contaminação do aquífero através da sua sobre-exploração, devido à mistura de águas.
- Contaminação devido à infiltração de efluentes líquidos nas proximidades do furo AC2.

No sentido de prevenir as ameaças acima referidas, apresentam-se as seguintes recomendações:

- Para a prevenção das características das águas termais, seria aconselhável marcar perímetros de proteção, tanto nas imediações do furo, como nos locais de recarga.
- Impermeabilizar os possíveis focos de contaminação existentes junto das Termas.
- Utilização controlada de pesticidas e fertilizantes.
- Evitar a sobre-exploração do aquífero.

Esta água continua a não poder ter a utilização merecida e desejada, devido ao facto de alguns meses sobretudo depois de períodos de precipitação atmosférica, pois nessas alturas aparecem nas análises efetuadas bactérias designadas por estreptococos fecais. Estas bactérias são tolerantes ao cloreto de sódio e a pH alcalinos, são anaeróbias facultativas e ocorrem isoladamente, em pares ou em cadeias curtas. A maioria das espécies não se multiplica em ambientes aquáticos (APDA, 2012).

A presença de microrganismos patogénicos (neste caso, estreptococos fecais) na água geralmente é decorrente da poluição por fezes humanas e de animais, provenientes de águas residuárias urbanas e rurais (Gonzalez *et al.*, 1982, citado em Duarte, 2011)

A existência destas bactérias poderá estar associada a infiltração de água existente nas fossas sépticas, ou mesmo da lixiviação desta, assim como pode ter origem na lixiviação de estrumes (neste caso muito pouco provável devido á baixa atividade pecuária exaustiva).

Como a existência destas bactérias é um constante nos períodos de maior precipitação poder-se-á proceder a uma impermeabilização dos furos, poço e ainda de fossas sépticas que sejam caracterizadas como prejudiciais para a água minerotermais.

Referências bibliográficas

- ACavaco (1999). Termalismo - Estudos e Projectos (Termas da Touca) - Relatório Final. Lisboa: Sondagens e Fundações A. Cavaco, Lda.
- ACavaco (2000). Desenvolvimento dos Recursos Hidrominerais das Termas da Touca - Relatório Final. Lisboa: Sondagens e Fundações A. Cavaco, Lda.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2012). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Tejo (PGRH Tejo). Relatório Técnico. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=834>
- Almeida, C., Mendonça, J. L., Jesus, M. R. & Gomes A. J. (2000a). Sistemas Aquíferos de Portugal Continental. Lisboa: Centro de Geologia / Instituto da Água.
- Almeida, C., Mendonça, J. L., Duarte, R.S., Quina A.P. & Neves J.R. (2000b). Glossário de Termos Hidrogeológicos. Lisboa: Centro de Geologia / Instituto da Água.
- American Public Health Association (APHA). (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22nd Ed). Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation Publishers.
- Appelo, C. A. J.; Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution (2 Ed.) London: A. A. Balkema Publishers.
- Arnórsson, S. (1983). Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems. Implications for chemical geothermometry investigations. Geothermics, 12, p. 119-128.
- Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas (APDA). (2012). Ficha técnica. FT-MB-03 - Escherichia Coli. Comissão Especializada de Qualidade da Água. Disponível em: http://www.apda.pt/site/ficheiros_eventos/201212041542-ft_mb_03_escherichia_coli.pdf
- Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas (APDA) (2012), Ficha técnica. FT-MB-04 - Enterococos intestinais. Comissão Especializada de Qualidade da Água. Disponível em: http://www.apda.pt/site/ficheiros_eventos/201212041543-ft_mb_04_enterococos_intestinais.pdf
- ASTER Global Digital Elevation Map (ASTER GDEM) - NASA (2013). ASTER Global Digital Elevation Map – NASA. Consultado em julho de 2015, disponível em <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

Atlas da Água (1995-2010) *Atlas da água*. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://geo.snirh.pt/AtlasAgua/>.

Atlas Digital do Ambiente (1980-). *Atlas do Digital do Ambiente*. Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território. Disponível em: <http://sniamb.apambiente.pt/webatlas/>.

Azevedo, M. & Aguado, B. (2013) - Origem e instalação de granitóides variscos na Zona Centro-Ibérica. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal, Volume I – Geologia Pré-mesozóica de Portugal* (p. 377-401). Lisboa: Escolar Editora.

Calado, C. & Almeida, C. (1993). Geoquímica do flúor em águas minerais da zona Centro-Ibérica. IX Semana de Geoquímica de Língua Portuguesa e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Memórias Nº 3 da Univ. do Porto, Ed. Noronha, F.; Marques, M. e Nogueira, P., Porto.

Calado, C. (2001). A Ocorrência de Água Sulfúrea Alcalina no Maciço Hespérico: Quadro Hidrogeológico e Quimiogénese. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.

Carvalho, D., Oliveira, J.T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M.T. & Monteiro, J.H. (1992). Carta Geológica de Portugal à escala 1: 500 000. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

Carvalho, J.M. (1996). Mineral water exploration and exploitation at the Portuguese Hercynian Massif. *Environmental Geology* 27:252–258.

Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I.; Afonso, M.J.; Marques, J.E.; Teixeira, J.; Cerqueira, A.; Coelho, A.; Gomes, A. & Fonseca, P.E. (2005). Prospecção Hidrogeológica da Área do Sistema Hidromineral das Caldas da Cavaca (Aguiar da Beira, Portugal Central): Implicações na Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. I Foro Ibérico. Madrid.

Carvalho, J.M.; Chaminé, H.I.; Afonso, M.J.; Marques, J.E.; Medeiros, A.; Garcia, S.; Gomes, A.; Teixeira, J. & Fonseca, P.E. (2005). Productivity and water costs in fissured-aquifers from the Iberian crystalline basement (Portugal): hydrogeological constraints.

Castilho, A.M.A. (2008). Lagoas de Quiaios – Contribuição para o seu conhecimento geológico e hidrogeológico. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Chaminé H.I.; Carvalho J.M.; Afonso M.J.; Teixeira J. & Freitas L. (2013). On a dialogue between hard-rock aquifer mapping and hydrogeological conceptual models: insights into groundwater exploration. *Eur Geol Mag J Eur Fed Geol* 35:26–31.

- Côa Rupestre (2009). Estudos e Trabalhos Para Qualificação de Recurso Hídrico Subterrâneo – Ponto da Situação de Trabalhos. Vila Nova de Foz Côa: Côa Rupestre, Lda. Agro-turismo & Ambiente, Estudos Geoturísticos e Hidrogeoambientais.
- Correia, C.A.G. (2014). Hidrogeologia, Hidroquímica e Análise de Risco dos Sistemas Aquíferos nas Envolventes das Exurgências de Montouro e de Olhos de Fervença (Cantanhede). Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Custódio, E. & Llamas, M. R. (Eds.) (2001). Hidrología subterránea (2 Ed.). Barcelona: Ediciones Omega.
- Decreto Lei 244/2002 de 5 de Novembro, Diário da República nº 255/2002 - I Série A. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. Lisboa.
- Dias, C. (2008). Água Destinada ao Consumo Humano. Riscos para a saúde humana resultantes da exposição a amónia. Nota Técnica. Departamento de Saúde Pública, Administração Regional De Saúde De Lisboa E Vale Do Tejo. Disponível em: <http://www.dgs.pt/delegado-de-saude-regional-de-lisboa-e-vale-do-tejo/programas--projetos--grupos-tecnicos/saude-ambiental/aguas-para-consumo-humano/notas-tecnicas/amonia-pdf.aspx>
- Domenico, P.A. & Schwartz, F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: Ed. John Willey & Sons.
- Duarte, P.B. (2011). Microrganismos Indicadores de Poluição Fecal em Recursos Hídricos. Pós-Graduação em Microbiologia. Instituto de Ciências Biológicas. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Esteves, F.M.G.F. (2009). Construção em Climas Tropicais Comportamento. Térmico de Edifícios em Luanda. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Favas, P.J.C. (2008). Biogeoquímica em Áreas Mineiras Estano-Volfrâmicas. Tese de Doutoramento. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Ferreira, A.S.; Romão, J. C.; Sequeira, A. & Oliveira, J. T (1995) - A sucessão Litostratigráfica Ante-ordovícica na Zona Centro-Ibérica (ZCI), em Portugal: ensaio de interpretação com base nos dados actuais. Comunicaciones à XIIª Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, Univ. Salamanca, p. 71-72.
- Ferreira, N.; Iglesias, M.; Noronha, F.; Pereira, E; Ribeiro, A. & Ribeiro, M. (1987). Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea, A. Carnicero, J.C. Gonzalo, M. López Plaza & M.D. Rodriguez Alonso (Eds.). Libro Homenaje a L. C. Garcia de Figueirola, Geologia de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hesperico. p. 37-51. Madrid: Editorial Rueda.

- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4th Ed.). London: Pearson Education International.
- Fialho, A.; Chambel, A. & Almeida, C. (1998). Caracterização Hidráulica de aquíferos fracturados por modelos de porosidade dupla no Concelho de Évora.
- Filho, D.B.F. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)*. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006). *Guidelines for soil description* (4th Ed.). Rome: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Disponível em: ftp://ftp.fao.org/aql/agll/docs/guidel_soil_descr.pdf
- Fournier, R.O. 1981. Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In: *Geothermal Systems: Principles and Cases Histories*, Rybach, L. e Muffler, L.J.P. (eds.), John Wiley & Sons.
- Fournier, R.O. (1991). Water geothermometers applied to geothermal energy. In: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. D'Amore, (ed.), United Nations Institute for Training and Research, USA, p. 37-69.
- Freeze, A.R. & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. New York: Ed. Prentice-Hall, NY.
- GeoPortal do LNEG. (2010). Visualizador de Mapas. Disponível em: <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html>
- Godard, A. – “Pays et Paysages du Granite” Col. le géographe, P.U.F., Paris.
- Golden Software Inc. (2014). *Surfer 12 Full User's Guide*. Powerful Contouring, Gridding & 3D Surface Mapping. Colorado, USA.
- Gomes, L.M.F. (2012). Modelos Geohidráulicos de Águas Minerais e de Nascente – Casos de Estudo da Região Centro. – Cap. VIII, Livro “Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Centro”, Cd. JA Simões Cortez, Ed. Mare Liberum-Fedrave. 183-204.
- Health Canada (2009) - *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*. Guideline technical Document, Health Canada, Ottawa.
- Hem, J.D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254, 263 p. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2254/html/pdf.html>
- Herculano de Carvalho, A., Almeida, J.D. & Reis, E.M. (1961) *Guia de análise química das águas (potáveis, minerais e para a indústria)*. Associação dos Estudantes do IST, Lisboa.
- Hipólito, J.R. & Vaz, A.C., (2011), *Hidrologia e Recursos hídricos*. Coleção Ensino da Ciência e Tecnologia, IST Press – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Hiscock, K. (2005). *Hydrogeology. Principles and practice*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Hiscock, K. & Bense, V. F. (2014). *Hydrogeology. Principles and practice*. (2nd. Ed.) Oxford: Wiley Blackwell.
- Institut Cartogràfic e Geològic de Catalunya (ICGC).(2015). Subsuelo, Gradiente y flujo de calor. Disponível em: http://www.igc.cat/web/es/subsol_geotermia_gradfluxcalor.html
- Instituto Geográfico Português (IGP) COS 2007 (Carta de Ocupação / Uso do Solo)
- Instituto Geográfico do Exército (IGE). (2000). *Carta Militar de Portugal 1:25000*. Continente. Série M 888. Lisboa: Instituto Geográfico do Exército.
- Instituto Nacional de Estatística (INE). (2015). As Novas Unidades Territoriais Para Fins Estatísticos (NUTS 2013). Editor, Instituto Nacional de Estatística, I.P.
- Instituto Português da Qualidade; Ministério da Economia e do Emprego; Comissão Setorial para Água (CS/04). (2012). *Manual de Boas Práticas para Execução e Exploração de Furos de Captação de Águas Subterrâneas*. Caparica: Instituto Português da Qualidade. Disponível em: http://www.ipq.pt/backfiles/Manual_Furos_Captacao_agua.pdf
- Instituto Superior Técnico (IST). (2001a). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Novembro de 2001. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2001b). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Dezembro de 2001. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2002a). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Janeiro de 2002. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2002b). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Fevereiro de 2002. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2002c). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Maio de 2002. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2002d). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Junho de 2002. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2002e). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Julho de 2002. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2009a). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Setembro de 2009. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2009b). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Outubro de 2009. Lisboa.

- Instituto Superior Técnico (IST). (2009c). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Novembro de 2009. Lisboa.
- Instituto Superior Técnico (IST). (2009d). Laboratório de Análises, análises químicas da água das Termas da Touca, furo AC2. Dezembro de 2009. Lisboa.
- Johnson, R. L., Keely, J. F., Palmer, C. D., Suflita, J. M., & Fish, W. (1989). Transport and fate of contaminants in the subsurface: Environmental Protection Agency, Seminar Publication no. EPA/625/4-89/019
- Julivert, M.; Fontboté, J. M.; Ribeiro, A. & Conde, L. E. N. (1972). Mapa Tectónico De La Peninsula Ibérica y Baleares. Ed. Instituto. Geológico. Minero. España, Escala 1:1.000.000.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants (4th Ed.). Boca Raton, CRC Press. Disponível em: http://www.petronet.ir/documents/10180/2323242/Trace_Elements_in_Soils_and_Plants
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel,. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Landim P.M.B. 2006. Sobre Geoestatística e mapas. Terræ Didactica, 2(1):19-33. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/terraedidactica/>
- Lima, A. (2011). Origem do Fluido e da Mineralização das Águas Sulfúreas. Universidade do Minho.
- Machadinho A. (2014). Modelação da geometria de rochas granitóides recorrendo a métodos geofísicos gravimétricos e magnéticos: uma contribuição para a avaliação do potencial geotérmico na região Centro de Portugal. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Matthess, G. & Harvey, J.C., 1982, The Properties of Groundwater, - Ed: John Wiley & Sons.
- Monreal, T. E., (1993). Formulacion Teorica Del Modelo Temez. Curso Sobre Modelos Hidrológicos de Simulación Continua de La Cuenca. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX.
- Moraes, P.B. (2008). ST 502- Tratamento Biológico de Efluentes Líquidos; ST 503- Tratamento Físico-químico de Efluentes líquidos. Curso Superior de Tecnologia em Saneamento Ambiental. Centro Superior de Educação Tecnológica, Universidade Estadual de Campinas.
- Morais, M.J.F. (2012). Sistemas Hidrominerais nos Terrenos Graníticos da Zona Centro Ibérica em Portugal Central: Perspectivas Químicas, Isotópicas, w Genéticas Sobre as Águas Sulfúreas. Tese De Doutoramento, Universidade De Coimbra.

- Negrão, S.G. (2012). Determinação dos isótopos naturais de rádio de meias-vidas longas, Ra-226 e Ra 228, em águas minerais utilizadas nos balneários de caxambu (MG) e águas de lindóia (SP), Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- Oliveira, J. M. S. (2011). Impacto das Alterações Climáticas na qualidade das águas subterrâneas de aquíferos carbonatados em Portugal. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa.
- Pais, J., Cunha, P., Legoinha, P., Dias, R., Pereira, D. & Ramos, A. (2013). Cenozóico das Bacias do Douro (sector ocidental), Mondego, Baixo Tejo e Alvalade. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg (Eds.), Geologia de Portugal, Volume II – Geologia Meso-Cenozóica de Portugal (p. 461-532). Lisboa: Escolar Editora.
- Paralta, E.A.; Francés, A.P. & Sarmento, P.A., 2009. Caracterização Hidrogeológica e Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição Agrícola do Aquífero Mio-Pliocénico da Região de Canhestros (Alentejo). 6º Congresso da Água, APRH.
- Parkhurst, D.L. & Appelo, C.A.J., 2013, Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, A43, 497 p., disponível em <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>
- Pinto, F. M. G. (2014). Estudo da distribuição do Estanho na Mina da Panasqueira. Tese de Mestrado. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Pure water handbook. (1997). 2th Edition: Minnetonka: Osmonics.
- Ramalho, L. & Moreira, M.M. (2004). Avaliação do Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica da Ribeira de Valverde. Calibração do Modelo Temez aplicado à Ribeira de Valverde. In Actas do 7º Congresso da Água Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH). Lisboa, 8 a 12 de março de 2004.
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1987). The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 2: Folds and Fractures. London: Academic Press, Inc.
- Regulamento (UE) n.º 868/2014 da Comissão, de 8 de agosto de 2014.
- Romão, J. C. (1994) Litoestratigrafia e tectónica do Grupo das Beiras (Complexo Xisto-Grauváquico (CXG)), entre o rio Ponsul e o Rio Erges, Beira Baixa (Portugal). Boletim Geológico y Minero, Vol. 105-6, 521-530.
- Romão, J. C. & Oliveira, J. T. (1995). Litoestratigrafia do Grupo de Vale do Grou (Série Intercalar) na região de Mação. Comunicaciones à XIIIª Reunião de Geologia do Oeste Peninsular. Univ. Salamanca, Setembro de 1995, p. 142-143.

- Romão, J. C. & Oliveira, J. T. (2001). Nota prévia sobre a composição petrográfica e geoquímica de metagrauvaques do Grupo das Beiras, no bordo SW da Zona Centro-Ibérica: implicações geotectónicas. Actas do VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa & XII Semana de Geoquímica, Faro, p.136-140.
- Romão, J., Metodiev, D., Dias, R. & Ribeiro, A. (2013). Evolução geodinâmica dos sectores meridionais da Zona Centro-Ibérica. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal, Volume I – Geologia Pré-mesozóica de Portugal* (p. 205-257). Lisboa: Escolar Editora.
- Roque, L.A.O.L. & Missagia, R.M. (2012). Análise do efeito da geometria dos poros nas propriedades físicas da rocha. *VÉRTICES, Campos dos Goytacazes/ RJ*, v.14, n. 2, p. 71-92.
- Sevilla, H.T. (2011). Analisis Interdisciplinario y Gestion Sostenible. Estudio de la Energia Geotermica de Catalunya. Casos de Caldes de Malavella. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona.
- Simões, M.M.C. (1993). Águas Minerais Portuguesas. Da sua caracterização físico-química ao esboço duma classificação. *Boletim de Minas*, vol 30 (1). Lisboa, p. 13-26.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). (1995-2015). Dados de Base da Rede Meteorológica. Disponíveis em: <http://snirh.apambiente.pt/>
- Stumm, W.; Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry. Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd Ed). New York: John Wiley & Sons Inc.
- Teixeira, J.; Chaminé, H.I; Carvalho, J.M.; Pérez-Alberti, A. & Rocha, F. (2013). Hydrogeomorphological mapping as a tool in groundwater exploration. *J Maps* 9(2):263–273
- Temez, J.R. (1978). *Calculo Hidrometeorologico de Caudales Maximos em Pequeñas Cuencas Naturales*. Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo. Madrid: Direccion General de Carreteras.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Guidelines for Drinking-Water Quality*, (4th ed). Geneva: WHO.