



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

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E RADIOLÓGICO DE ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NAS ENVOLVENTES DAS TERMAS DA  
AMIEIRA, SOURE**

Alexandre Maria Perdigão Alves

**MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS**  
**Área de especialização em Recursos Geológicos**

**Orientadores científicos**

Prof. Doutor José Manuel Martins de Azevedo, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira, Faculdade de Ciências e Tecnologia,  
Universidade de Coimbra

**Julho, 2014**



## Resumo

A presente tese apresenta a caracterização e classificação hidrogeológicas dos domínios enquadrantes das Termas da Amieira, nomeadamente da área compreendida entre Moinho de Almoxarife, Serro Ventoso e Azenha (Soure). Apresenta-se também a caracterização físico-química *in situ* e da radioatividade natural das diversas unidades aquíferas inseridas na sequência local de Formações sedimentares.

A área em estudo insere-se dentro dos Sistemas aquíferos aluviões do Mondego e da Figueira da Foz-Gesteira.

O conjunto de unidades aquíferas locais compreende algumas de natureza freática não-confinada, nomeadamente as implantadas nos depósitos aluvionares do Rio Pranto e linhas de água principais, e outras confinadas a semi-confinadas; neste grupo destaca-se o aquífero hidrotermal que alimenta as Termas da Amieira, Bicanho e Banhos da Azenha e que se implementará na Formação geológica dos Arenitos do Carrascal. A ascensão e descarga da água termal está condicionada pela presença de uma fratura regional com orientação N25°W e aproximadamente paralela ao Rio Pranto e pela interceção de fraturas locais com orientação preferencial N45°E e N80°E. O fluxo subterrâneo das unidades aquíferas semi-confinadas a confinadas realiza-se de nordeste para sudoeste em direção ao Rio Pranto.

As três nascentes termais – Amiera, Bicanho e Azenha - apresentam em Janeiro e Junho, valores médios de temperatura de 25,3°C e 27,4°C, pH de 7.10 e 7.70 e condutividade elétrica de 896  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1165  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respetivamente. Os restantes pontos de água – nascentes “frias” e poços - apresentam em Janeiro e Junho, valores médios de temperatura, de 13,2°C e 19,8°C, pH de 6,9 e 7.2 e condutividade elétrica de 481  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 606  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respetivamente.

Os valores máximos de concentração de radão são 93,4 Bq/l e 77,0 Bq/l em Janeiro e Junho respetivamente. Os valores máximos de concentração de rádio são 79 mBq/l e 80 mBq/l em Janeiro e Junho, respetivamente. Os valores máximos das concentrações de Urânio total são de 5,5 ppb e 4,5 ppb em Janeiro e Junho, respetivamente.

Os valores médios das concentrações de Urânio total e rádio são inferiores a concentrações determinadas em estudos anteriores em regiões próximas à área em estudo. Apenas os valores de concentração de radão são superiores a estudo anterior realizado na região de Condeixa-a-Nova.

No que concerne a efeitos para a saúde pública, os resultados calculados para a dose efetiva nos pontos de água analisados revelam estar abaixo dos limites legais estipulados pelo Decreto-lei 306/2007 e norma comunitária 2013/51/EURATOM não representando perigo radiológico. Aconselha-se cuidado no consumo de água num ponto analisado, devido às concentrações de radão de 93,4 Bq/l em Janeiro e 77 Bq/l em Junho, perto dos limites legais de 100 Bq/l.

**Palavras-chave:** Hidrogeologia; aquífero; nascentes; hidrotermalismo; radioatividade natural;

## **Abstract**

*This thesis presents the hydrogeological characterization and classification of the areas around Termas da Amieira, namely between Moinho de Almoxarife, Serro Ventoso and Azenha (Soure). Also shows the physico-chemical characterization in situ and natural radioactivity of the various aquifer units inserted in the local sequence of sedimentary Formations.*

*The study area falls within the aquifer Systems of Aluviões do Mondego and Figueira da Foz-Gesteira.*

*The set of local aquifer units comprises some of unconfined phreatic nature, particularly those deployed in the alluvial deposits of the Pranto River and main water lines, and other confined to semi-confined; this group highlight the hydrothermal aquifer that feeds Termas da Amieira, Bicanho and Banhos da Azenha, and will be implemented in the geological Formation of Arenitos do Carrascal. The rise and discharge of thermal water is conditioned by the presence of a regional fracture orientated N25°W and approximately parallel to the Pranto River and with the interception of local fractures, with preferred orientation N45°E and N80°E. The underground flow of the semi-confined and confined aquifer units takes place from northeast to southwest in the Pranto River direction.*

*The three thermal springs - Amiera, Bicanho and Azenha - presents in January and June, mean values of temperature of 25.3° C and 27.4°C, pH 7.10 and 7.70 and electrical conductivity 896  $\mu$ S/cm to 1165 $\mu$ S/cm, respectively. The remaining water points – “cold” springs and wells - present in January and June, mean values of temperature of 13.2°C and 19.8°C, pH 6.9 and 7.2 and conductivity of 481  $\mu$ S/cm and 606  $\mu$ S/cm, respectively. The maximum concentration values of radon are 93.4 Bq/l and 77.0 Bq/l in January and June, respectively. The maximum concentration values of radium are 79 mBq/l and 80 mBq/l in January and June, respectively. The maximum concentration values of Total uranium are 5.5 ppb and 4.5 ppb in January and June, respectively.*

*The mean values of the total uranium and radium are lower than the concentrations determined in previous studies in nearby regions of the study area. Only the values of radon concentration are higher than the previous study conducted in the Condeixa-a-Nova area. Regarding the effects on public health, the calculated results for the effective dose in analyzed water points revealed to be under the legal limits established by Decreto-Lei 306/2007 and Council Directive 2013/51/EURATOM not representing radiological hazard. Caution is advised in water consumption at an analyzed point, due to radon concentrations of 93.4 Bq/l in January and 77Bq/l in June, close to legal limit of 100 Bq/l.*

**Keywords:** *Hydrogeology; aquifer; springs; hydrothermalism; natural radioactivity;*

## **Agradecimentos**

Quero 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 pela orientação, ensinamentos e disponibilidade ao longo da tese e anos de curso.

Ao Professor Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira pela orientação, ensinamentos e disponibilidade ao longo desta tese.

Aos meus pais, António e Filomena, meu irmão Rui e tia Carolina, por tudo, pois sem eles nada teria sido possível.

À Ana, minha namorada, pelo carinho e apoio ao longo dos anos.

Aos meus amigos e colegas, Bernardo Santos, Eduardo Costa, João Alves, João Carreira, João Henriques, Jorge de Carvalho, Mafalda Miranda, Nelson Oliveira, Rafael Faim e Ricardo Perdigão, pela amizade e apoio ao longo dos anos de curso e na realização desta tese.

A todas as outras pessoas que não referi, mas que também contribuíram direta e indiretamente para o término bem-sucedido deste ciclo.

## Índice

Resumo.....	I
Abstract.....	II
Agradecimentos.....	III
<b>Índice de Figuras.....</b>	<b>VI</b>
Índice de Tabelas.....	VIII
1 – Introdução.....	1
1.1 – Interesse e enquadramento do tema em estudo.....	1
1.2 – Área em estudo.....	3
1.3 – Objetivos.....	3
2 – Fundamentos Teóricos e Estado da Arte.....	4
2.1 – Fundamentos Teóricos.....	4
2.1.1 – Conceitos gerais de Hidrogeologia.....	4
2.1.2 – Conceitos básicos de Radioatividade natural.....	6
2.2 – Estado da Arte.....	8
2.2.1 – A radioatividade natural em Portugal.....	8
2.2.2 – Implicações na Saúde.....	12
2.2.3 – Legislação sobre limites de radionuclídeos em águas.....	12
3 – Enquadramento Regional.....	15
3.1 – Enquadramento Geográfico e Administrativo.....	15
3.2 – Enquadramento Geológico e Tectónico.....	16
3.3 – Hidrológico: Hidrográfico e Climatológico.....	18
3.3.1 – Hidrográfico.....	18
3.3.2 – Climatológico.....	19
3.4 – Enquadramento Hidrogeológico.....	21
4 – Enquadramento Local.....	26
4.1 – Topográfico e Hidrográfico.....	26
4.2 – Geológico e Tectónico.....	28
4.2.1 – Geológico.....	28
4.2.2 – Tectónico.....	34
4.3 – Uso e Ocupação do Solo.....	37
5 – Metodologias utilizadas.....	39
5.1 – Consulta Bibliográfica.....	39
5.2 – Atividades de campo.....	39
5.3 – Análise laboratorial.....	42
5.3.1 – Radão.....	42
5.3.2 – Urânio e Rádio.....	43
5.4 – Trabalho de Gabinete.....	45
6 – Caracterização Hidrogeológica.....	46
6.1 – Pontos de água selecionados e medições <i>in situ</i> .....	46

6.2 – Caracterização e Classificação Hidrogeológicas .....	49
6.3 – Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	53
7 – Caracterização Físico-química e Radiológica .....	57
7.1 – Parâmetros físico-químicos <i>in situ</i> .....	57
7.1.1 – Temperatura .....	57
7.1.2 – Condutividade elétrica .....	59
7.1.3 – pH .....	64
7.2 – Parâmetros radiológicos .....	66
7.2.1 – Radão .....	66
7.2.2 – Rádio .....	71
7.2.3 – Urânio .....	76
7.2.4 – Dose efetiva .....	87
8 – Considerações finais e Recomendações .....	89
Referências Bibliográficas .....	92

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Cadeia de Decaimento do $^{238}\text{U}$ (adaptado de Figueiredo, 1998 <i>in</i> Gomes <i>et al.</i> , 2007).....	7
Figura 2.2 - Fórmula de cálculo da dose efetiva segundo Diretiva comunitária 96/29/EURATOM.....	13
Figura 3.1 - Enquadramento geográfico e administrativo da área em estudo na NUTIII - Baixo Mondego (CCDRC, 2014).....	15
Figura 3.2 - Localização geográfica da área de estudo (a amarelo) no concelho de Soure ( <i>Google Earth</i> , 2014).....	16
Figura 3.3 - Enquadramento do local estudo (caixa vermelha) nos grandes domínios geológico-tectónicos de Portugal Continental.....	17
Figura 3.4 - Enquadramento do local estudado (caixa vermelha) na Bacia hidrográfica do Rio Mondego (PGBH4, 2012).....	18
Figura 3.5 - Precipitação média anual na área em estudo (caixas a vermelho) (PGBH4, 2012).....	19
Figura 3.6 - Temperatura média anual na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego e na área em estudo (caixa a branco) (PGBH4).....	20
Figura 3.7 - Evapotranspiração Potencial na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego e na área em estudo nos anos de 1961 a 2000 (PGBH4, 2012).....	21
Figura 3.8 - Unidade Hidrogeológica da Orla Ocidental e respetivos Sistemas aquíferos com indicação dos Sistemas onde se insere a zona em estudo (setas a verde) (SNIRH, 2014).....	22
Figura 3.9 - Área em estudo sobreposta aos Sistemas aquíferos Aluviões do Mondego (06) e Figueira da Foz-Gesteira (07).....	25
Figura 4.1 - Área em estudo com representação da rede de drenagem (adaptado das Cartas militares nº239 - Figueira da Foz e nº 249 – Marinha das Ondas).....	27
Figura 4.2 - Aspeto da Formação geológica dos Calcários apinhoados da Costa de Arnes (C <sup>2-3</sup> ).....	29
Figura 4.3 - Aspeto da Formação geológica dos Calcários apinhoados da Costa de Arnes (C <sup>2-3</sup> ).....	30
Figura 4.4 - Aspetos da Formação geológica Arenitos do Carrascal (C <sup>1-2</sup> ).....	31
Figura 4.5 - Aspetos da Formação geológica dos Arenitos do Carrascal (C <sup>1-2</sup> ).....	31
Figura 4.6 - Aspetos gerais da Formação geológica dos Arenitos da Boa Viagem (J <sup>4-5</sup> ).....	32
Figura 4.7 - Aspetos gerais da Formação geológica dos Arenitos da Boa Viagem (J <sup>4-5</sup> ).....	33
Figura 4.8 - Zonas de fratura em sector da Formação geológica: Calcários apinhoados da Costa de Arnes (C <sup>2-3</sup> ).....	35
Figura 4.9 - Zonas de fratura em sectores da Formação geológica dos Arenitos do Carrascal (C <sup>1-2</sup> ).....	35
Figura 4.10 - Fracturação existente na área de estudo (adaptado da Carta Geológica de Portugal, folha 19-C Figueira da Foz dos Serviços Geológicos de Portugal, à escala 1:50000).....	36
Figura 4.11 - Uso e ocupação do solo na área em estudo .....	38
Figura 5.1 - Área de estudo com indicação dos pontos de água reconhecidos (sobre fragmento da Carta Geológica de Portugal, folha 19-C Figueira da Foz).....	40
Figura 5.2 - Localização dos pontos de água selecionados para medições <i>in situ</i> e amostragem (sobre fragmento das Cartas Militares do Exército, folhas nº 239 – Figueira da Foz e nº 249 – Marinha das Ondas à escala 1:25.000).....	41
Figura 5.3 - Equipamentos utilizados para medição <i>in situ</i> de parâmetros físico-químicos da água.....	42

Figura 5.4 - Recolha das amostras de água para determinação da concentração de radão.....	43
Figura 5.5 - Tratamento das amostras de rádio em placa de aquecimento.....	44
Figura 5.6 - Tratamento das amostras de urânio.....	45
Figura 6.1 - Pontos amostrados na área de estudo inseridos nos Sistemas Aquíferos Aluviões do Mondego (06) e Figueira da Foz-Gesteira (07).....	47
Figura 6.2 - Enquadramento geológico e hidrológico com indicação do perfil realizado.....	55
Figura 6.3 - Perfil com orientação N80°E interpretativo da geologia e hidrogeologia da área em estudo( modelo conceptual).....	56
Figura 7.1 - Distribuição da Condutividade elétrica nos pontos de água medidos em Janeiro.....	61
Figura 7.2 - Distribuição da Condutividade elétrica nos pontos de água medidos em Junho.....	56
Figura 7.3 - Concentração de radão em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo (Bq/l).....	67
Figura 7.4 - Distribuição de radão-222 nos pontos de água medidos em Janeiro.....	69
Figura 7.5 - Distribuição de radão-222 nos pontos de água medidos em Junho.....	70
Figura 7.6 – Concentração de rádio-226 em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo (mBq/l).....	72
Figura 7.7 - Distribuição do rádio-226 nos pontos de água analisados em Janeiro.....	74
Figura 7.8 - Distribuição do rádio-226 nos pontos de água analisados em Junho.....	75
Figura 7.9 - Concentração de urânio-238 em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.....	77
Figura 7.10 - Distribuição das concentrações de urânio-238 nos pontos de água em Janeiro.....	78
Figura 7.11 - Distribuição do urânio-238 nos pontos de água analisados em Junho.....	79
Figura 7.12 - Concentração de urânio-234 em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.....	80
Figura 7.13 - Distribuição do urânio-234 nos pontos de água analisados em Janeiro.....	81
Figura 7.14 - Distribuição do urânio-234 nos pontos de água analisados em Junho.....	82
Figura 7.15 - Concentração de urânio total em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.....	83
Figura 7.16 - Distribuição do urânio total nos pontos de água analisados em Janeiro.....	84
Figura 7.17 - Distribuição do urânio total nos pontos de água analisados em Junho.....	85
Figura 7.18 - Valores de dose efetiva para cada ponto de água analisado (mSv/ano).....	88

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Teores médios de urânio e concentração de radão em diversas litologias de Portugal (adaptado de Pereira <i>et al.</i> , 2003).....	9
Tabela 2.2 - Concentrações de vários radionuclídeos em Horta da Vilarça (Pereira <i>et al.</i> , 2009); Abaixo do limite de deteção – $\leq$ ld.....	11
Tabela 2.3 - Concentrações de vários radionuclídeos na região de Condeixa-a-Nova (Morgado, 2011); Abaixo do limite de deteção – $\leq$ ld.....	11
Tabela 3.1 - Valores de precipitação atmosférica média mensal na Bacia hidrográfica do Rio Mondego entre os anos de 1932 a 2002 (PGBH4).....	19
Tabela 3.2 - Temperaturas médias mensais e anual ponderada (°C) na Bacia hidrográfica do Rio Mondego para os anos 1961 a 2000 (PGBH4).....	20
Tabela 3.3 - Evapotranspiração potencial média mensal e anual ponderadas (mm) na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego para os anos de 1961 a 2000 (PGBH4).....	20
Tabela 4.1 - Síntese da geologia presente na área em estudo (matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	34
Tabela 6.1 - Características gerais dos pontos estudados; (- não determinado).....	48
Tabela 6.2 - Matriz de caracterização e classificação hidrogeológicas das diversas Formações geológicas que ocorrem na área em estudo (Valores da Porosidade e da Condutividade hidráulica retirados da bibliografia especializada (*); matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	50
Tabela 6.3 - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: a – Aluvião (matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	51
Tabela 6.4 - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: P – Areias, grés e argilas (matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	51
Tabela 6.5 - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: C <sup>2-3</sup> Calcários apinhoados da Costa de Arnes (matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	52
Tabela 6.6 - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: C <sup>1-2</sup> Arenitos do Carrascal (matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	52
Tabela 6.7 - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: J <sup>4-5</sup> Arenitos da Boa Viagem (matriz adaptada de Azevedo, 2008).....	53
Tabela 7.1 - Resultados das medições <i>in situ</i> da Temperatura da água (°C; - não determinado).....	57
Tabela 7.2 - Tratamento estatístico da Temperatura (°C) nas campanhas de campo.....	58
Tabela 7.3 – Resultados das medições <i>in situ</i> da Condutividade Elétrica – C.E. ( $\mu$ S/cm; - não determinado).....	59
Tabela 7.4 - Tratamento estatístico da Condutividade elétrica – C.E. ( $\mu$ S/cm) nas campanhas de campo.....	60
Tabela 7.5 - Resultados das medições <i>in situ</i> do pH da água; (- não determinado).....	64
Tabela 7.6 - Tratamento estatístico dos valores de pH medidos nas campanhas de campo.....	65

Tabela 7.7 - Concentração de radão de cada ponto amostrado em Janeiro e em Junho (Bq/l; - não determinado).....	66
Tabela 7.8 - Tratamento estatístico da concentração de radão nas duas campanhas de campo (em Bq/l).....	68
Tabela 7.9 - Concentração de rádio-226 de cada ponto amostrado em Janeiro e em Junho (mBq/l; <Id abaixo do limite de deteção; - não determinado).....	71
Tabela 7.10 - Tratamento estatístico da concentração de rádio-226 nas duas campanhas de campo (em mBq/l).....	72
Tabela 7.11 - Concentrações de <sup>238</sup> U, <sup>234</sup> U e U Total de cada ponto de água amostrado em Janeiro e em Junho (<Id abaixo do limite de deteção; - não determinado).....	76
Tabela 7.12 - Tratamento estatístico da concentração dos isótopos <sup>238</sup> U e <sup>234</sup> U nas campanhas de campo de Janeiro e Junho (<Id abaixo do limite de deteção).....	86
Tabela 7.13 - Valores do cálculo da dose efetiva de cada ponto amostrado em Janeiro e em Junho (mSv/ano; - não determinado).....	87



## 1 – Introdução

### 1.1 – Interesse e enquadramento do tema em estudo

A água é essencial para a vida e deveras importante no desenvolvimento social das civilizações, nomeadamente na saúde, necessidades básicas e desenvolvimento económico, através de diversas atividades industriais, exploração de recursos geológicos, turismo, energia e atividades recreativas.

A água é o líquido mais abundante na Terra, estando estimado que exista cerca de 1600 M de km<sup>3</sup>. Aproximadamente 15% desta água está quimicamente ligada à crosta terrestre. Cerca de 97,5% é água salgada e os restantes 2,5% são de água doce. Destes 2,5% de água doce, a parcela correspondente às águas superficiais e subterrâneas pouco profundas é de apenas 0,3 %, enquanto 30% corresponde a águas subterrâneas profundas e os restantes 69,5 % a glaciares e neve permanente. 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 e à saúde e bem-estar das pessoas, como beber, cozinhar, higiene das pessoas e outros consumos domésticos;
- Utilizações de consumo público: escolas, hospitais, comércio e serviços, bombeiros, jardins, lavagens de ruas e outros serviços urbanos;
- Utilizações para fins económicos, sendo a água utilizada como fator económico;
- Utilizações ligadas à conservação ambiental.

Considerada até há poucas décadas com um recurso inesgotável, sabe-se agora que se trata de um recurso renovável mas finito, cuja disponibilidade é fortemente influenciada quer pela variabilidade climática quer pela forma como se utiliza, consome e rejeita, quer ainda pelo uso e ocupação do solo (Hipólito & Vaz, 2011).

De facto o volume de água na Terra não sofre alterações, apenas diminuindo a quantidade e qualidade de água potável devido às inevitáveis atividades antropológicas no desenvolvimento das sociedades e aumento da população mundial que advém desse desenvolvimento.

A dinâmica da água na Terra é efetuada através dum ciclo designado por Ciclo Hidrológico e segundo Cortez (2012), esse pode ser de três tipos:

- No Ciclo direto as águas evaporam-se dos oceanos, mares, lagos e cursos de água, condensam-se na atmosfera, precipitam sob a forma de chuva ou neve, infiltram-se no substrato

## 1 – Introdução

ou escoam pela superfície, emergem em fontes, acabando por desaguar nos oceanos, mares e lagos de onde provieram.

- No ciclo inverso, as águas existentes nos oceanos, mares e lagos infiltram-se pelas fendas ou poros dos seus fundos. Descem, aquecem e sobem em consequência deste aquecimento. Emergem em fontes, voltam a escoar-se e desembocam nos locais de origem.

- No ciclo magmático, as águas provenientes da destilação dos magmas sobem por canais, emergem à superfície, escoam-se e desembocam nos rios, mares, lagos e oceanos.

As reservas de água subterrâneas são 300 vezes superiores às reservas de água superficial, embora a sua utilização sustentável seja muito limitada pelo longo tempo de residência que largamente superior em relação à água superficial. A água subterrânea tem muitas vezes melhor qualidade biológica e mais baixo teor de sedimentos que a água superficial, por beneficiar de um longo tempo de residência (Hipólito & Vaz, 2011).

Tendo em conta a importância da água enquanto bem essencial para a vida e recurso que deve ser preservado e utilizado de forma sustentada, a presente tese insere-se no Mestrado de Geociências – ramo de Recursos Geológicos e procura relacionar a Geologia e a Hidrogeologia de um domínio localizado na Orla Meso-cenozoica Ocidental portuguesa com a radioatividade natural das águas subterrâneas locais.

É sabido que a radioatividade natural nas águas subterrâneas depende de vários fatores litológicos como os teores, nas rochas e solos, de urânio (U), tório (Th) e potássio (K), mas também da permeabilidade e distribuição mineralógica do urânio. A radioatividade natural é responsável, em média, por 85% da dose total anual de radiação ionizante recebida pelo ser humano, cabendo ao radão metade deste valor (Neves & Pereira, 2004).

O território continental português é composto por rochas graníticas e metassedimentares, integradas no Maciço Hercínico, assim como rochas sedimentares meso-cenozoicas nas bordaduras ocidental e sul. Algumas destas rochas são ricas em radionuclídeos e em mineralizações de urânio, normalmente associadas a rochas graníticas. Parece existir também transferência de radionuclídeos para as águas que circulam nestas rochas, especialmente  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e U águas subterrâneas da Orla Meso-cenozoica Ocidental apresentam concentrações de urânio superiores a rochas do Maciço Hercínico, que por sua vez apresentam valores de  $^{222}\text{Rn}$  superiores às anteriores (Pinto *et al.*, 2008).

Marques, J. (2012) refere também, que ocorrem na Orla, nascentes termais junto às falhas que originam os vales tifónicos das áreas de diapirismo e como resultado estas águas são cloretadas-bicarbonatadas-sódicas e por vezes sulfatadas cálcicas. A temperatura de emer-

gência que da grande maioria destas águas termais apresenta potencialidades como recurso geotérmico. A temperatura da maioria destas águas termais oscila entre os 40°C e 45°C.

Assim durante a realização desta tese foram efetuados medições de parâmetros físico-químicos *in situ* e recolha de amostras em pontos de água – nascentes hidrotermais, nascentes de “águas frias” e poços -, a fim de se determinar concentrações de radionuclídeos específicos tais com o radão-222, rádio-226 e urânio. Como suporte científico convém referir que a Orla Meso-cenozoica Ocidental foi alvo de diversos trabalhos no que concerne á radioatividade natural em rochas e em águas, aos quais se dá destaque nos que se concentram no estudo das águas. Nesse sentido, é de extrema importância como base, os trabalhos de Correia Marques *et al.* (1979) e, mais recentemente Morgado (2011) aos quais se dará maior destaque no capítulo seguinte

Nesta tese, embora não se tenham medido parâmetros geoquímicos que permitam aferir sobre a fácies das águas termais, determinaram-se parâmetros físico-químicos e radiológicos em três nascentes hidrotermais existentes na região, no caso Termas da Amieira, Bicanho e Banhos da Azenha.

## **1.2 – Área em estudo**

A área em estudo localiza-se na freguesia de Samuel, concelho de Soure, distrito de Coimbra. Está limitada a leste pelas povoações de Serro Ventoso e Coles de Samuel, a sul por Azenha, a oeste pelo rio Pranto e a norte por Moinho de Almocharife.

## **1.3 – Objetivos**

Os objetivos fundamentais da presente tese são: (1) efetuar uma caracterização hidrogeológica do domínio selecionado; (2) estabelecer o modelo hidrodinâmico conceptual para as unidades aquíferas locais; (3) efetuar a caracterização físico-química *in situ* e radiológica das águas subterrâneas que evoluem no sector estudado.

Como objetivo secundário, a realização deste estudo permitiu obter e consolidar conhecimentos nos domínios da Hidrogeologia e da Radioatividade natural, nomeadamente da Orla Meso-cenozoica.

## 2 – Fundamentos Teóricos e Estado da Arte

Neste capítulo são apresentados primeiramente, os principais fundamentos teóricos sobre Hidrogeologia e Radioatividade natural. Seguidamente expõe-se uma síntese do estado da arte em relação aos conhecimentos sobre a Radioatividade natural em Portugal, as implicações para a saúde, e por fim síntese da legislação existente no que concerne a águas para consumo humano.

### 2.1 – Fundamentos Teóricos

De forma a melhor desenvolver o tema da presente tese discutem-se seguidamente alguns conceitos da Hidrogeologia e da Radioatividade natural relacionados com a geologia do domínio estudado.

#### 2.1.1 – Conceitos gerais de Hidrogeologia

Considerando os enquadramentos, geológico e hidrogeológicos do domínio escolhido para este estudo, apresentam-se seguidamente algumas definições hidrogeológicas relevantes. As definições apresentadas baseiam-se largamente em HIDROLEX (2014).

**Água subterrânea** corresponde à água do subsolo que ocupa a zona saturada. Corresponde, na maioria dos casos, à parte da precipitação que se infiltrou no solo e atingiu os sistemas aquíferos. A água subterrânea resulta de uma acumulação ao longo de períodos de tempo variáveis, entre meses e milhares de anos, não se encontrando diretamente exposta às condições climáticas. Move-se muito lentamente, podendo emergir nos rios, lagos e oceanos ou abastecer furos e poços. As águas subterrâneas apresentam, geralmente, composição química, pH e mineralização total dentro dos parâmetros exigidos por lei (Decreto-Lei 208/2008), podendo ser utilizadas diretamente sem qualquer tratamento, na grande maioria dos casos. Atualmente, a água subterrânea assume um papel primordial no desenvolvimento socioeconómico, viabilizando as mais diversas atividades e constituindo, por vezes, a única fonte de água para o abastecimento urbano, industrial e agrícola (HIDROLEX, 2014). A água subterrânea evolui em poros existentes nas formações geológicas que são de vários tipos – granulares (inter e intragranular), fissurais, de dissolução (cársicos), por vesiculação e estratificação.

A **Porosidade** corresponde à razão entre o volume de espaços vazios e o volume total (HIDROLEX, 2014). A **porosidade efetiva** é o parâmetro que mede a percentagem do volume de um solo ou formação aquífera disponível para armazenamento temporário de água. Corresponde à relação entre o volume de vazios ocupáveis pela água que circula por ação da gravidade e o volume total do solo ou formação aquífera (HIDROLEX, 2014). A facilidade de

circulação de água (ou outro fluido) no meio geológico é designada por **Condutividade Hidráulica** (equivalente a Permeabilidade). Esta propriedade depende das características do meio tais como, porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, e das propriedades do fluido como a viscosidade e peso específico (HIDROLEX, 2014). Em função da porosidade e condutividade hidráulica apresentada, as formações rochosas classificam-se em aquíferas e não-aquíferas.

**Aquífero** - Estrutura ou formação geológica que permite o armazenamento e circulação da água através dos seus poros ou fraturas, de modo a que o Homem possa aproveitá-la em quantidades economicamente viáveis tendo em conta um determinado uso. Existem vários **tipos de aquíferos**. Estes podem ser classificados de acordo com a localização geográfica, pressão da água, de acordo com a geologia do material saturado e ainda de acordo com a pressão da água e capacidade de transmissão de água. Na área estudada ocorrem aquíferos do tipo poroso e de tipo cársico.

**Aquífero Poroso** - Aquífero onde a água circula através dos poros inter-granulares da rocha. Este tipo de aquíferos ocorre em rochas sedimentares consolidadas, em sedimentos não consolidados e em solos arenosos resultantes da decomposição *in situ* das rochas. Os aquíferos porosos geralmente constituem importantes reservas hídricas, pelo grande volume de água que armazenam, e também por a sua ocorrência abranger grandes áreas. Os aquíferos porosos de granulometria grosseira podem fornecer caudais muito avultados, particularmente quando têm conexão hidráulica com águas superficiais, apresentando ainda um apreciável potencial de autodepuração (capacidade de um corpo ou substância, designadamente a água, se auto purificar ou recuperar as suas qualidades ecológicas e sanitárias, através de processos naturais (físicos, químicos e biológicos), depois de receber uma carga poluidora).

**Aquífero Cársico** - Aquífero que ocorre em rochas solúveis, geralmente calcárias e dolomíticas, onde ações mecânicas e químicas originam cavidades de dissolução (dissolução do carbonato da rocha pela água) que pode atingir grandes dimensões. Quando há conexão hidráulica entre as diversas cavidades, podem constituir-se verdadeiros cursos de água subterrânea, que permitem a circulação rápida da água. Os aquíferos cársicos são extremamente vulneráveis à contaminação, podendo proporcionar caudais avultados, de forma irregular, no espaço e no tempo.

Algumas formações rochosas podem conter quantidades apreciáveis de água, contudo, transmitem-na muito lentamente, não sendo viável o seu aproveitamento económico. Estas formações designam-se assim por **Aquitardo**. Em condições especiais, estas formações podem tornar-se muito importantes, por permitem a recarga vertical de aquíferos. Os **Aqui-**

**clusos** são formações geológicas que embora porosas e capazes de armazenar água, a transmitem a água muito lentamente, não permitindo, tal como o aquífero, a exploração economicamente viável de água.

Em certos locais emergem águas subterrâneas naturalmente aquecidas. Estas nascentes – **Nascentes Hidrotermais** – estão associadas a um conjunto de processos relacionados com a circulação nas formações geológicas de fluidos aquosos aquecidos - Hidrotermalismo – e têm como principal ação a alteração hidrotermal nos minerais e, conseqüentemente, nas rochas, e a alimentação de nascentes hidrotermais. Estes fluidos podem ter proveniência sedimentar, ígnea, metamórfica, meteórica, marinha ou mantélica.

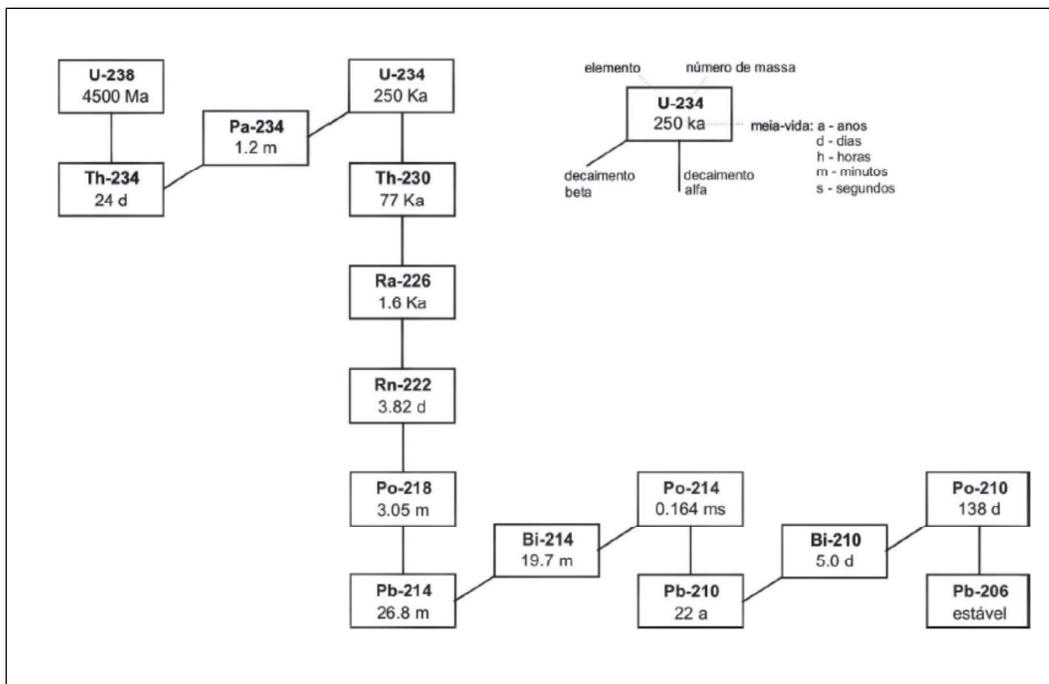
### 2.1.2 – Conceitos básicos de Radioatividade natural

A radioatividade foi descoberta por Antoine Henri Becquerel, em 1896, na sequência da investigação das propriedades de materiais fluorescentes (sais de urânio), aos quais reconheceu a emissão de radiação independente da indução por uma fonte de energia externa. Consiste na transformação natural e espontânea de isótopos instáveis, por emissão de radiação alfa ou beta, em isótopos de elementos químicos distintos (Neves & Pereira, 2004).

Alguns elementos químicos presentes no meio ambiente são naturalmente radioativos. Estes são encontrados em solos, rochas, águas, ar (exterior e interior) e nos corpos de diversos organismos (OMS, 2012).

No âmbito desta tese dar-se-á destaque aos elementos químicos Urânio, Rádio e Radão. Estes elementos podem ser encontrados na água como resultado de processos naturais como a erosão e transporte. Dá-se destaque também a outras definições do âmbito da radioatividade como Bequerel, Dose efetiva e Sievert.

**Urânio** – o urânio ocorre principalmente em granitos mas também em diferentes tipos de rocha e é uma mistura de três radionuclídeos ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ ) que decaem emitindo radiação alfa e beta (OMS, 2012). Na figura seguinte (Fig. 2.1) observa-se a cadeia de decaimento de  $^{238}\text{U}$ , que origina os isótopos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  em estudo na presente tese.



**Figura 2.1** - Cadeia de Decaimento do  $^{238}\text{U}$  (adaptado de Figueiredo, 1998 *in* Gomes *et al.*, 2007).

**Rádio** – o rádio é geralmente muito móvel em ambientes aquosos, e os seus isótopos ( $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  e  $^{223}\text{Ra}$ ) têm tempos de meia-vida muito díspares e a sua transferência para a água resulta maioritariamente da dissolução mineral ou lixiviação dos seus isótopos com maior período de meia-vida. Associam-se ainda mecanismos de adsorção para os isótopos de meia-vida mais curta. Esta diferença de períodos de meia-vida permite estabelecer diferenças na escala de tempo dos processos de interação água-rocha (Condomines *et al.*, 2012).

**Radão** – é um gás radioativo que tem origem na cadeia de decaimento do urânio, elemento químico que ocorre com teores variáveis nas rochas, nos solos e nas águas. Sendo um gás inerte, pode facilmente migrar de locais onde é produzido ou dissolver-se na água contida nos poros dos materiais geológicos (Pereira *et al.*, 2001).

O risco ao gás radão depende de diversos fatores geológicos, como sejam os teores nas rochas e solos de elementos radiogénicos urânio, tório e potássio, da permeabilidade e ainda da distribuição mineralógica do urânio (Neves & Pereira, 2004).

Pereira *et al.* (2001), refere ainda que a concentração de radão na água subterrânea depende do local de captação; ainda que o contexto geológico das captações seja análogo, a concentração do Radão poder ser muito diferente de captação para captação. De facto a con-

## 2 – Fundamentos Teóricos e Estado da Arte

centração de radão em aquíferos depende das suas características geológicas, geoquímicas e litológicas, ou seja, contexto geológico (Ferreira, 2009).

**Bequerel** é a unidade usada para a radioatividade no Sistema Internacional (SI) - corresponde a uma desintegração por segundo.

### 2.2 – Estado da Arte

#### 2.2.1 – A radioatividade natural em Portugal

O território continental português caracteriza-se por uma grande diversidade de litologias aflorantes em duas unidades morfo-estruturais; o maciço Hespérico, constituído por rochas ígneas e metamórficas de idade paleozoica e pré-câmbrica, e a orla Meso-Cenozoica, onde ocorrem essencialmente rochas sedimentares. Segundo síntese elaborada por Neves *et al.*, (1996) sobre a distribuição de U em rochas portuguesas bem como sobre a intensidade da radiação gama emitida pelos mesmos materiais e expressa em choques por segundo (através de cintilómetro SPP2 da empresa Saphymo):

- As rochas de composição próxima da média crustal geram 100 cps (choques por segundo);

- As rochas sedimentares, nomeadamente os carbonatos apresentam teores baixos de U, 0 a 5 ppm e reduzida intensidade da radiação gama (30 a 50 cps). Nas unidades margosas associadas os teores de U ascendem a 20ppm. Nos grés e arcoses o conteúdo em U varia de 1 a 6 ppm e a radiação gama entre 50 a 200 cps. Já para os sedimentos argilosos e argilo-gresosos os teores de U estão acima de 6ppm, podendo atingir os 200ppm. A radiação gama varia entre 120 a 600 cps, podendo atingir localmente 1000 a 6000 cps;

- As rochas metamórficas apresentam teores de urânio que não ultrapassam 5ppm (próximo de valores médios crustais) e radiação gama entre 70 a 120 cps para Xistos e Grauwiques e 30 a 50cps para quartzitos;

- Nas rochas ígneas, concretamente em granitoides os teores em U variam entre 6,7 a 8,9ppm para os granitoides biotíticos e granitoides de duas micas respetivamente. A radiação gama varia entre 150 a 300 cps mas podem ocorrer anomalias com valores superiores a 10 000 cps. As rochas ígneas ácidas apresentam características radiométricas semelhantes aos granitoides mas as básicas apresentam teores baixos.

Pereira *et al.* (2003), determinaram teores de urânio e concentrações de radão nos solos derivados de diferentes litologias, na região de Coimbra, Figueiró dos Vinhos, Tondela, Castelo Branco e Tábua-Guarda. Na Tabela seguinte (Tabela 2.1) apresenta-se a síntese dos

dados obtidos (média aritmética para o caso do U e geométrica para a concentração de radão nos solos).

**Tabela 2.1** - Teores médios de urânio e concentração de radão em diversas litologias de Portugal (adaptado de Pereira *et al.*, 2003).

Litologia		Teor em U ppm	Concentração de radão (kBq/m <sup>3</sup> )
Região de Coimbra	Rochas carbonatadas	1,9	2,0
	Sedimentos areno-conglomeráticos	3,8	6,0
	Sedimentos areno-pelíticos	10,2	28,0
	Xistos, grauvaques e quartzitos (quando existentes)	4,4	12,0
Gnaisses e micaxistos de região de Figueiró dos Vinhos	3,8	Não disponível	
Granito de Figueiró dos Vinhos	4,8	13,0	
Granito de Tondela	7,9	29,0	
Granito de Castelo Branco	8,2	26,0	
Granito de Tábua-Guarda	11,7	52,0	

**Em relação a pontos de água:**

Correia Marques *et al.* (1979), determinaram a distribuição hidrogeoquímica de U na Orla Meso-cenozoica Ocidental, em quatro bacias hidrográficas (Vouga, Mondego, Lis e Zêzere). Destacam-se neste trabalho os valores relativos à bacia do Mondego, uma vez que são os que têm maior interesse para a presente tese. Nesse sentido os autores determinaram para o Triásico, teores de urânio inferiores a 4ppb em pontos de água, localizados sobre o “Grés de Silves” (Grupo de Silves) e máximo observado de 15 ppb. Os valores para a radiação gama variam entre 50 a 200 cps, atingindo pontualmente 2000 cps.

Em relação ao Jurássico, as camadas do Malm (equivalente lateral das camadas J<sup>3c</sup> e J<sup>4-5</sup> em estudo na presente tese) na região de Pombal, apresentam valores de urânio total de 0,8 a 3ppm, para os níveis argilosos e de argilas margosas (J<sup>3c</sup>) e, de 1 a 3,4 ppm para os níveis gresosos (J<sup>4-5</sup>). Mais para sul na região de Espite-Matas, o contacto destas formações do Jurássico com a base dos “grés grosseiros a muito grosseiros” do Cretácico (equivalente

de  $C^{1-2}$ ) determinaram-se valores de 11 a 97ppm (pontualmente 320 ppm) em amostras de argilas negras e de 6,8 a 17ppm em amostras de grés argilosos muito finos e, a sul de Leiria, valores de 42 ppm. Os autores afirmam que o Jurássico apresenta valores da radiação gama entre 60 a 120 cps, atingindo-se 2500 cps no Complexo de Vale de Lagares.

Em relação ao Cretácico, o “grés grosseiro inferior” ( $C^{1-2}$ ) em S.Fipo a 2km SW de Condeixa-Nova, apresenta valores de 0,8 a 3,5 ppm de urânio total, sendo o valor mais alto referente a uma bancada argilo-gresosa cinzento-escura na passagem para a “Formação carbonatada” ( $C^{2-3}$ ).

Mais a norte, na margem direita do rio Mondego e próximo de Tentugal, determinou-se 36ppm para o nível argilo-gresoso cinzento equivalente. Mais próximo de Coimbra, entre Cioga do Monte e Sargento-Mor, em pontos de água localizados quer sobre a “Formação Carbonatada” ( $C^{2-3}$ ) quer sobre o “Grés Micácio fino a muito fino” ( $C^4$ ) obtiveram-se valores superiores a 15ppb com máximo de 33ppb em Cioga do Monte. Em Vinha da Rainha (8km a W de Soure) registou-se valor pontual de 62 ppb em água de dois poços.

Na “Formação Carbonatada” ( $C^{2-3}$ ) Correia Marques *et al.* (1979) refere que os valores radiométricos são normalmente baixos, oscilando entre 30 a 50 cps atingindo máximos de 200 cps em Rebolia e em S.Fipo. Na Amieira determinaram-se valores de urânio total entre 0,4 a 5,7 ppm. Em relação ao “grés micáceo fino a muito fino” ( $C^4$ ), nos níveis inferiores, os valores de fundo radiométrico são uniformemente elevados, na ordem de 120 cps e pontualmente 600 cps. No entanto os valores de urânio total são baixos variando de 1,4 a 5,9 ppm. Para o topo desta formação a litologia passa a grés grosseiro a muito grosseiro, atingindo valores de 2,2 a 5,4 ppm de urânio total (Rebolia e S.Fipo) e radiação gama da ordem dos 60 a 70 cps.

Pereira *et al.* (2003), determinou em 66 pontos de água (nascentes, poços e furos), para a região de Oliveira de Hospital, cuja litologia dominante é o granito porfiroide, concentrações de radão variadas. Nas nascentes, a média geométrica da concentração de radão é de 183 Bq/l, mas em águas que circulam sobre falhas ricas em urânio a concentração aumenta substancialmente para 920 Bq/l. No que respeita a furos a média geométrica determinada é de 1002 Bq/l e em poços é de apenas 59 Bq/l.

Mais tarde, Pereira *et al.* (2007), determinaram concentrações de radão em águas subterrâneas pertencentes ao Maciço Hespérico, que variam entre 19 a 8830 Bq/l. Os aquíferos em rochas graníticas têm médias geométricas de 104 Bq/l (Granito de Seia), 159 Bq/l (Granito de Tondela), 204 Bq/l (Granito de Castelo Branco), 281 Bq/l (Grupo de Caramulo-Boa Aldeia) e 373 Bq/l (Granito das Beiras). No que concerne a pontos de água localizados sobre

rochas metassedimentares, a média geométrica varia entre 35 a 323 Bq/l, sendo que há um aumento de concentração para 196 Bq/l quando estas rochas são metamorfizadas por granitos.

Também Carvalho *et al.* (2007), determinaram concentrações de radionuclídeos, desta feita para o  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$ , em sedimentos de certos troços do rio Mondego, tendo obtido valores 25 mBq/l e 20mBq/l assim como de 3500 Bq/Kg e 1250 Bq/Kg para o  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$  respetivamente.

Pereira *et al.* (2009), em Horta da Vilarça (Torre de Moncorvo) determinaram concentrações de vários radionuclídeos de águas subterrâneas recolhidas em furos, localizados sobre rochas metassedimentares em auréolas de metamorfismo de contacto, a diferentes distâncias do contacto com o maciço granítico. Apresentam-se na Tabela seguinte (Tabela 2.2) os resultados obtidos por estes autores.

**Tabela 2.2** - Concentrações de vários radionuclídeos em Horta da Vilarça (Pereira *et al.*, 2009);  
Abaixo do limite de deteção – ≤ld.

Radionuclídeo	Mínimo	Máximo	Mediana
$^{222}\text{Rn}$ (Bq/l)	64,00	9784,00	400,00
$^{226}\text{Ra}$ (Bq/l)	≤ld	2,41	0,08
$^{234}\text{U}$ (Bq/l)	≤ld	43,00	2,20
$^{238}\text{U}$ (Bq/l)	≤ld	48,10	1,60
U total (ppb)	≤ld	3483,00	129,00

Morgado (2011), em trabalho sobre a radioatividade natural em águas subterrâneas da região de Condeixa-a-Nova, determina concentrações de vários radionuclídeos em 16 pontos de água localizados sobre “Arenitos de Carrascal” ( $\text{C}^4$ ) e aluvião. Na Tabela (Tabela 2.3) que se segue sumariza-se os dados recolhidos.

**Tabela 2.3** - Concentrações de vários radionuclídeos na região de Condeixa-a-Nova (Morgado, 2011); Abaixo do limite de deteção – ≤ld.

	$^{222}\text{Rn}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{234}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	U total (ppb)
Média (Bq/l)	13,00	0,07	0,60	1,00	82
Mínimo (Bq/l)	1,50	≤ld	≤ld	≤ld	≤ld
Máximo (Bq/l)	58,00	0,60	6,80	12,00	940,00

### 2.2.2 – Implicações na Saúde

Como consequência da desintegração dos isótopos radioativos de U, Th e K existentes nas rochas, são emitidas radiações ionizantes alfa, beta e gama, de intensidade proporcional às concentrações daqueles isótopos (Neves *et al.*, 1996)

As transformações causadas a nível celular pela exposição à radiação ionizante traduzem-se, para doses elevadas, na perda de funções orgânicas, consequência da lesão ou morte celular. A exposição a baixos níveis de radiação ionizante, contudo, não origina efeitos aparentes imediatos, mas sim alterações no ADN, tendo ocorrência muito posterior à exposição sob a forma de doenças cancerígenas ou da transmissão hereditária de malformações (Neves *et al.*, 2004)

Tendo em conta que é fraca a capacidade de propagação da radiação alfa e beta, apenas constituem um risco para as populações quando ocorre a inalação de radão em quantidades excessivas (Neves *et al.*, 1996)

Para além do impacto resultante da sua inalação, o radão representa uma preocupação devido ao risco de indução de cancro do estômago, provocado pelo consumo de águas com elevados níveis de radão. Este aspeto é fundamental quando se utiliza águas de poços ou furos, que podem apresentar elevadas concentrações de radão, ao invés de águas provenientes de redes de abastecimento públicas, que perdem a maioria do radão durante o processo de tratamento a que são submetidas (Gomes *et al.*, 2007).

De todos os descendentes do radão, o  $^{218}\text{Po}$  e o  $^{214}\text{Po}$  são os que provocam maiores danos nos tecidos humanos, quando inalados, o que se deve ao facto de serem ambos emissores de radiação alfa, extremamente lesiva para os tecidos pulmonares, dado o seu elevado potencial energético.

Gomes *et al.* (2007) referem ainda que apesar do principal efeito nefasto atribuído ao radão ser o cancro do pulmão, diversos estudos têm procurado encontrar relações deste gás com o aparecimento de outras doenças oncológicas ou não, tais como aterosclerose e cancro de rins e bexiga.

### 2.2.3 – Legislação sobre limites de radionuclídeos em águas

Existem várias legislações e recomendações tanto a nível nacional, como europeu e mesmo mundial. Mencionando, primeiramente, as Diretivas europeias da Comunidade Europeia da Energia Atómica (CEEA ou EURATOM), a diretiva 96/29/EURATOM estabelece a fórmula de cálculo para a dose efetiva (Fig. 2.2) e a Diretiva Comunitária 98/83/CE estabelece como seu limite para águas de consumo humano 0,1mSv/ano.

**Dose efetiva (E)** é a soma das doses equivalentes (dose absorvida nos tecidos ou órgãos, ponderada em função do tipo e qualidade da radiação) ponderadas em todos os tecidos ou órgãos de corpo, resultante da irradiação interna ou externa;

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

**Figura 2.2** - Fórmula de cálculo da dose efetiva segundo Diretiva comunitária 96/29/EURATOM.

Desideri *et al.* (2007), utilizaram esta fórmula simplificada para cálculo da dose efetiva por ingestão dos radionuclídeos,

### **E=KGCT**

Sendo:

**E** – dose efetiva por ingestão (Sv – Sievert):

**K** – fator de conversão por ingestão de determinado radionuclídeo (Anexo III na diretiva comunitária 96/29/EURATOM);

**G** – Quantidade de água consumida por cada grupo etário (a recente Diretiva Comunitária 2013/51/EURATOM considera um consumo de 730 litros anuais);

**C** – Concentração ou atividade de determinado radionuclídeo;

**T** – Duração do consumo (365 dias);

**Sievert (Sv)** – designação especial da unidade da dose equivalente e da dose efetiva. Um sievert equivale a um joule por quilograma.

A Diretiva comunitária 2001/928/EURATOM estabelece, para água de consumo, a concentração de radão não carece de ações de correção caso o valor seja inferior a 100 Bq/l. Os Estados-Membros deverão definir um nível de referência variável entre este valor e 1000 Bq/l a partir do qual deve ser considerada a aplicação de ações corretivas para proteger a saúde humana. No que concerne a concentrações de polónio-210 e chumbo-210, os limites estabelecidos são de 0,1 Bq/l e 0,2 Bq/l respetivamente.

Mais recentemente, a diretiva comunitária 2013/51/EURATOM (ainda sem entrada em vigor em Portugal) estabelece como valores paramétricos 100 Bq/l para radão e trítio e 0,1 mSv para a dose indicativa. Os Estados-Membros podem fixar um nível de referência para o radão que se considere inadequado superar, mas que terá que ser inferior a 1000 Bq/l. Consi-

## 2 – Fundamentos Teóricos e Estado da Arte

dera-se que se justificam medidas de correção por motivos de proteção radiológica sempre que as concentrações de radão excedam 1000 Bq/l.

No que concerne à dose indicativa, os Estados-Membros devem rastrear a atividade radioativa medida pelos parâmetros alfa ou beta total. Para estas atividades, os valores paramétricos são de 0,1 Bq/l e 1 Bq/l para alfa total e beta total respetivamente. Se estes valores forem superados, será exigida a análise de radionuclídeos específicos. Neste caso terão que ser tidas em conta as concentrações teóricas máximas estimadas para cada radionuclídeo de forma que não seja ultrapassado o valor definido para a dose indicativa (0,1mSv/ano). Essas concentrações, designadas por derivadas são de 3,0 Bq/l para o  $^{238}\text{U}$ , 2,8 Bq/l para  $^{234}\text{U}$  e 0,5 Bq/l para  $^{226}\text{Ra}$  ou serão utilizadas as tabelas no anexo III da Diretiva 96/29/EURATOM).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda para a atividade alfa e beta total os valores de 0,5 Bq/l e 1 Bq/l respetivamente. Caso a este valor seja superado então, as águas de consumo humano tomam como limites:

**Urânio:**  $^{238}\text{U}$  – 10 Bq/l;  $^{234}\text{U}$  – 1 Bq/l

**Rádio:**  $^{226}\text{Ra}$  – 1 Bq/l;  $^{224}\text{Ra}$  – 1 Bq/l

No que concerne à dose indicativa este valor é de 0,1 mSv/ano. Outros valores que a OMS estipula são a concentração de U na água de 0,03mg/l (30µg/l) e de radão ( $^{222}\text{Rn}$ ) de 100 Bq/l; Este limite para o radão é consideravelmente superior que os limites dos radionuclídeos anteriores, uma vez que 90% da dose recebida é por inalação e não por ingestão.

Do ponto vista legal em Portugal, o Decreto-Lei 306/2007 de 27 de Agosto de 2007 estabelece os limites máximos para água destina ao consumo humano,  $\alpha$  -total de 0,5 Bq/l,  $\beta$  -total de 1 Bq/l, Trítio de 100 Bq/l e dose indicativa (ou efetiva) total de 0,1 mSv/ano (só é determinada quando ocorrem incumprimentos dos parâmetros alfa total e ou beta total. Nestes casos procede-se à determinação das concentrações dos radionuclídeos específicos emissores alfa e/ou beta.

### 3 – Enquadramento Regional

Neste capítulo são feitos os enquadramentos regionais para a área estudada; sendo estes: (1) Geográfico e Administrativo; (2) Geológico e Tectónico; (3) Hidrológico: Hidrográfico e Climatológico e (4) Hidrogeológico.

#### 3.1 – Enquadramento Geográfico e Administrativo

A área em estudo enquadra-se na Região Centro de Portugal (NUT II), mais concretamente, na sub-região do Baixo Mondego (NUT III) (Fig. 3.1), concelho de Soure e freguesia de Samuel (Fig. 3.2). A gestão das massas de água da região é da responsabilidade da ARH Centro.

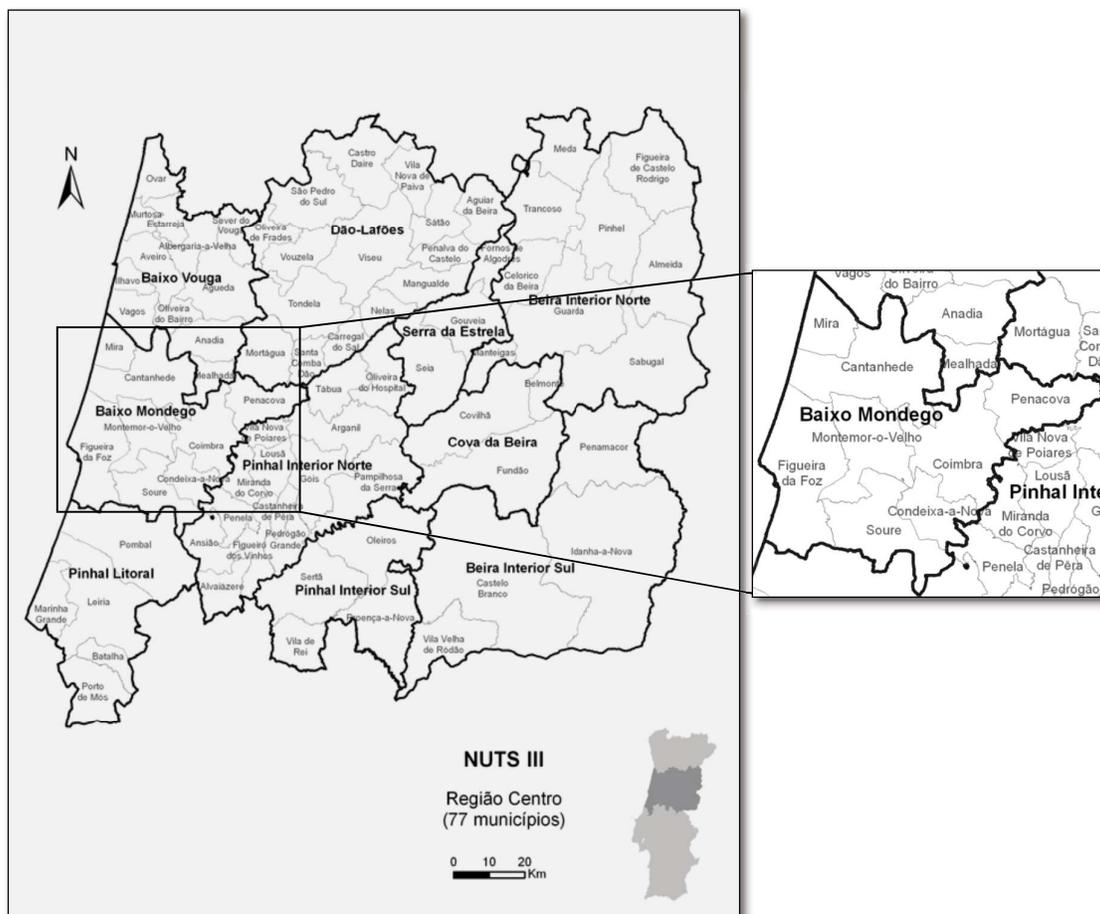


Figura 3.1 – Enquadramento geográfico e administrativo da área em estudo na NUTIII - Baixo Mondego (CCDR, 2014).

### 3 – Enquadramento Regional

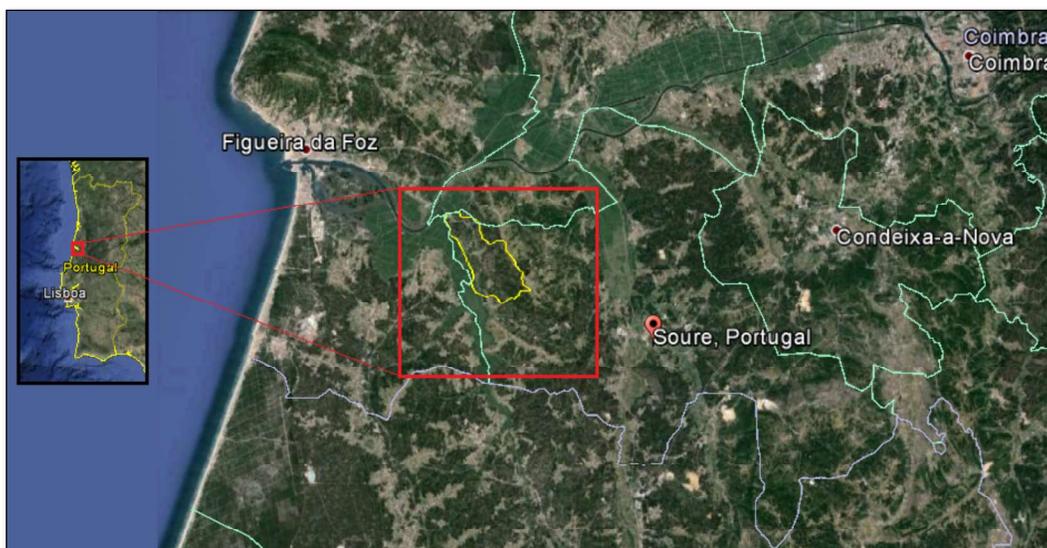


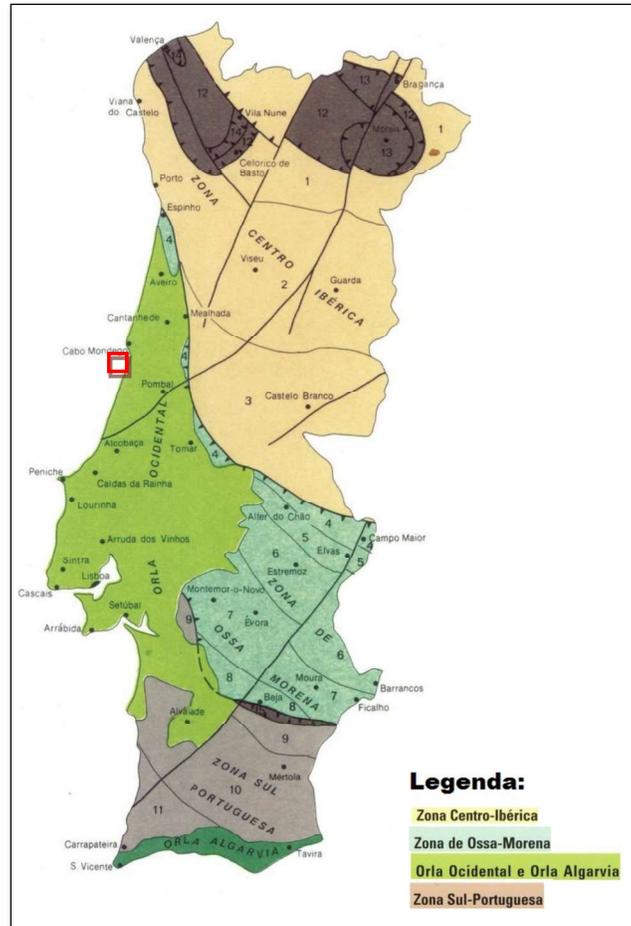
Figura 3.2 – Localização geográfica da área de estudo (a amarelo) no concelho de Soire (Google Earth, 2014).

### 3.2 – Enquadramento Geológico e Tectónico

A área em estudo está inserida na Orla Meso-cenozoica Ocidental (Fig. 3.3). Os terrenos que constituem a Orla Ocidental depositaram-se numa bacia sedimentar, cuja abertura coincide com os primeiros estádios da abertura do Oceano Atlântico, a Bacia Lusitânica. A leste, encontra-se individualizada do Maciço Hespérico pela falha Porto-Coimbra-Tomar, a sul pelo ramo desta fratura, com direção NNE, que se estende até ao canhão de Setúbal; e a ocidente por um *horst* hercínico, atualmente materializado pelos granitos e rochas metamórficas do arquipélago das Berlengas (Almeida *et al.*, 2000a).

O regime tectónico da Bacia Lusitânica é caracterizado pela presença de famílias de acidentes de várias direções que correspondem em grande parte ao rejogo pós-hercínico da rede de fraturas tardi-hercínicas. Ao longo destes acidentes, a cobertura é deformada por dobras, falhas e dobras-falhas que delimitam os blocos (Ribeiro *et al.*, 1980).

Ainda, segundo os mesmos autores, a fracturação dominante, que corresponde às direções principais de fracturação Hercínica do soco mostra três orientações preferenciais: NNE-SSW, coincidente com os principais alinhamentos diapíricos; ENE-SSW, paralela aos acidentes de orientação bética; e NW-SE, orientação das falhas secundárias no interior dos blocos limitados pelos acidentes maiores.



**Figura 3.3** – Enquadramento do local estudo (caixa vermelha) nos grandes domínios geológico-tectónicos de Portugal Continental.

As estruturas diapíricas, associadas ao complexo evaporítico hetangiano, formam duas bandas alongadas segundo a direção geral NNE-SSW, correspondendo a halocinese para W, na banda ocidental e, para E, na banda oriental. A migração do complexo evaporítico provocou o aparecimento de vários anticlinais, de perfil assimétrico (Almeida *et al.*, 2000a).

Um desses anticlinais é o anticlinal de Verride. O anticlinal de Verride pertence a uma estrutura diapírica complexa que se prolonga de NW para SE e que compreende outras estruturas de menor escala, como o monoclin das serras da Boa Viagem e Alhadas e o anticlinal diapírico de Soure. O anticlinal de Verride constitui, por isso, um domínio fortemente tectonizado, com três principais famílias de fraturas (Almeida *et al.*, 2000a): (1) NNW-SSE; (2) WNW-ESE; e (3) NNE-SSW;

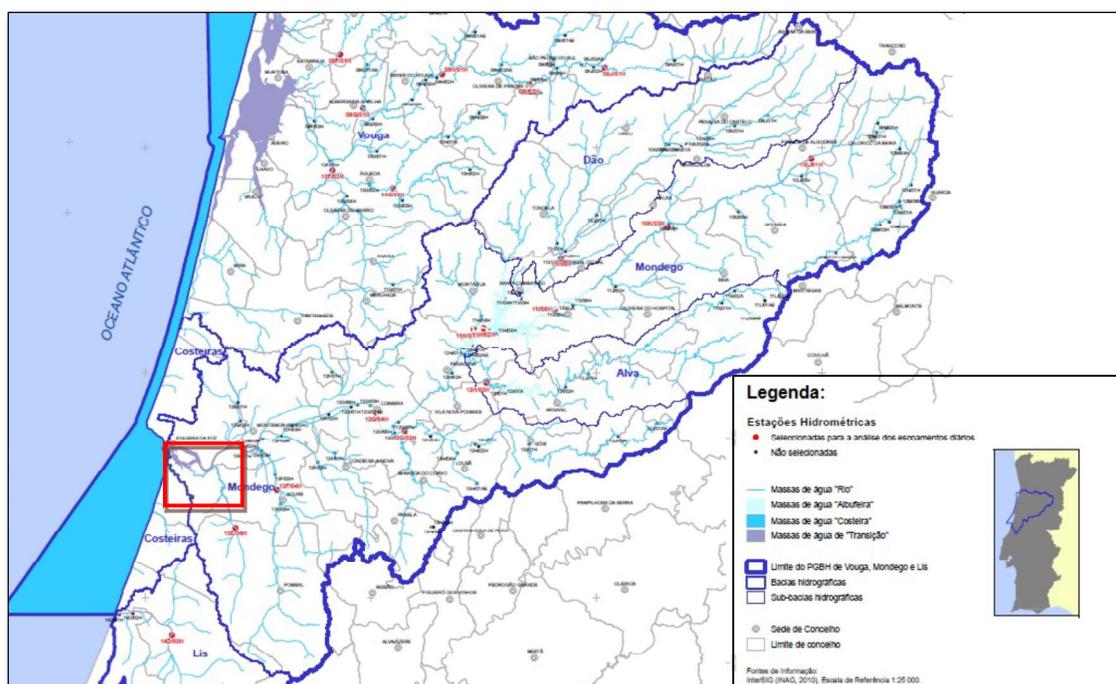
As principais famílias de fraturas não estão confinadas ao próprio anticlinal de Verride, prolongando-se para Oeste em direção à área em estudo nesta tese, facto observável no campo.

### 3.3 - Hidrológico: Hidrográfico e Climatológico

#### 3.3.1 – Hidrográfico

Segundo o *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4 (PGBH4)* (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2013) a área em estudo enquadra-se na Bacia hidrográfica do rio Mondego e, mais concretamente, na sub-bacia do Rio Pranto (Fig. 3.4).

O Rio Pranto é um afluente do Rio Mondego, com cerca de 45km, que nasce junto à povoação de Louriçal, concelho de Pombal, distrito de Leiria, e que desagua junto a Alqueidão, na margem esquerda do Rio Mondego.



**Figura 3.4** – Enquadramento do local estudado (caixa vermelha) na Bacia hidrográfica do Rio Mondego (PGBH4, 2012).

A área em estudo localiza-se numa dada zona, encaixado entre a margem direita do Rio Pranto e a margem esquerda do Rio Mondego. Encontra-se limitada a norte pela povoação de Moinho de Almoxarife.

### 3.3.2 – Climatológico

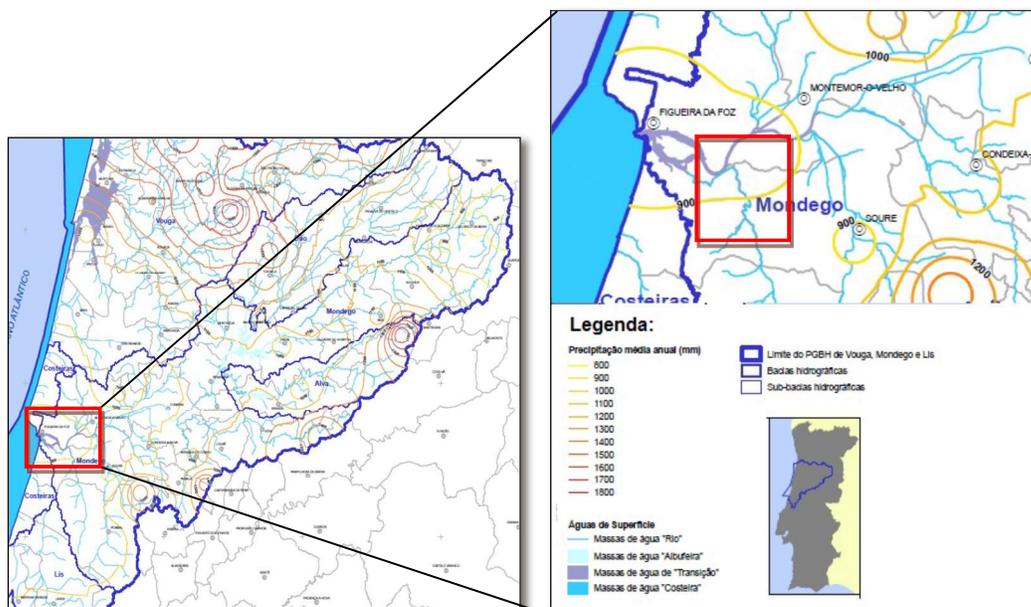
#### 3.3.2.1 – Precipitação atmosférica

No que respeita à precipitação, a Bacia hidrográfica do rio Mondego, apresenta os valores mais elevados da precipitação média mensal entre os meses de Outubro e Março, com particular destaque nos meses de Dezembro e Janeiro, picos máximos com 154mm, e os valores mais baixos entre Abril e Setembro, com destaque para os meses de Julho e Agosto que apresentam os valores mais baixos de todo o ano, com 14 e 15mm respetivamente (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1** – Valores de precipitação atmosférica média mensal na Bacia hidrográfica do Rio Mondego entre os anos de 1932 a 2002 (PGBH4).

Bacia	Parâmetros	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Mondego	Média	101	132	154	154	124	113	90	83	42	14	15	51
	Mínimo	12	1	6	2	11	0	22	2	3	0	0	4
	Máximo	331	437	453	394	386	319	257	184	166	79	63	149
	Des. padrão	70	87	107	108	101	84	52	45	35	16	14	38

A precipitação anual média para a Bacia Hidrográfica do Rio Mondego é de 1073mm (anos contabilizados entre 1932 a 2002), e para a área em estudo nesta tese o valor é de 900mm (Fig. 3.5).



**Figura 3.5** – Precipitação média anual na área em estudo (caixas a vermelho) (PGBH4, 2012).

### 3 – Enquadramento Regional

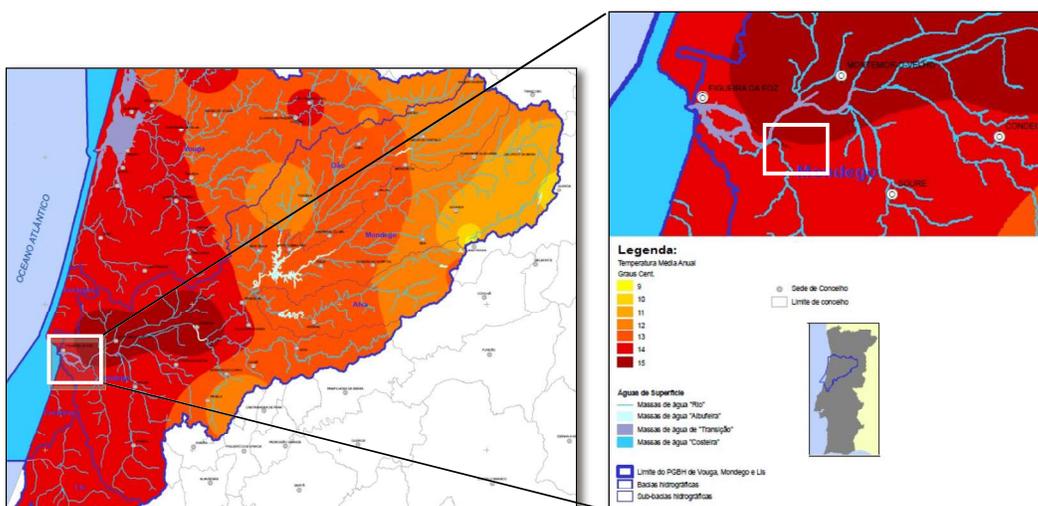
#### 3.3.2.2 – Temperatura atmosférica

Em relação à temperatura média anual ponderada, a Bacia Hidrográfica do Mondego apresenta um valor médio de 13,4°C, com os valores mais elevados a ocorrerem nos meses de Julho e Agosto e o valor mais baixo em Janeiro, com valores próximos em Dezembro e Fevereiro (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2** – Temperaturas médias mensais e anual ponderada (°C) na Bacia hidrográfica do Rio Mondego para os anos 1961 a 2000 (PGBH4).

Bacia	Parâmetro	Temperatura média mensal e anual ponderada (°C)												
		Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
Mondego	Min	9.7	6.2	4.1	3.0	3.6	5.3	6.0	9.1	13.8	17.5	17.6	14.8	9.2
	Max	17.4	13.0	10.8	11.0	12.0	14.2	15.5	18.0	19.6	21.8	21.8	20.8	15.7
	Média	14.4	10.4	8.1	7.4	8.4	10.1	11.4	14.0	17.6	20.0	20.0	18.4	13.4
	Desvio Padrão	1.1	1.3	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3	0.8	0.5	0.5	0.6	1.1

A temperatura média para a área em estudo nesta tese é de 14°C (Figura 3.6).



**Figura 3.6** – Temperatura média anual na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego e na área em estudo (caixa a branco) (PGBH4).

#### 3.3.2.3 – Evapotranspiração Potencial

No que concerne à Evapotranspiração Potencial média anual, esta apresenta um valor médio de 711,2mm (Tabela 3.3) e de 115,8mm para a Evapotranspiração Potencial mensal média para a Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (PGRH4, 2012).

**Tabela 3.3** – Evapotranspiração potencial média mensal e anual ponderadas (mm) na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego para os anos de 1961 a 2000 (PGBH4).

Bacia	Parâmetro	Evapotranspiração potencial média mensal e anual ponderada (mm)												
		Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Anual
Mondego	Min	44.9	24.2	13.4	11.7	14.0	25.8	31.8	54.8	85.0	106.0	94.1	68.9	596.4
	Max	65.2	36.3	27.2	29.6	33.9	53.6	66.1	92.5	104.4	125.8	115.3	93.6	784.8
	Média	56.2	31.0	21.6	19.8	23.2	36.9	47.5	70.5	96.6	115.8	107.8	84.5	711.2
	Desvio Padrão	2.8	2.9	3.2	3.7	3.9	4.0	5.6	5.0	2.5	3.9	3.5	2.3	20.5

A área em estudo apresenta valores em linha com a restante Bacia hidrográfica do Rio Mondego, variando entre os 725mm a 800mm (Figura 3.7).

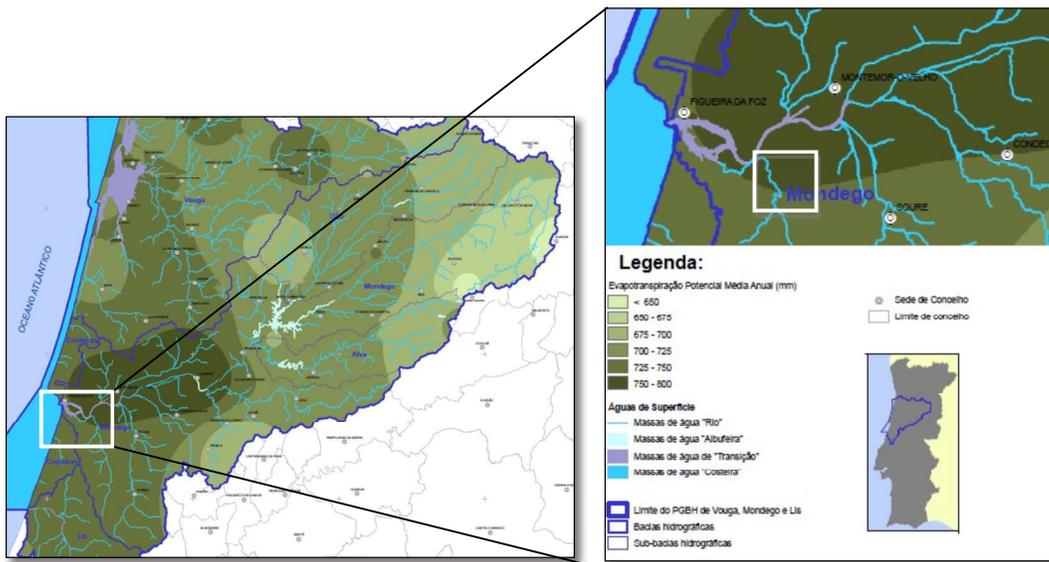


Figura 3.7 – Evapotranspiração Potencial na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego e na área em estudo nos anos de 1961 a 2000 (PGBH4, 2012).

### 3.4 – Enquadramento Hidrogeológico

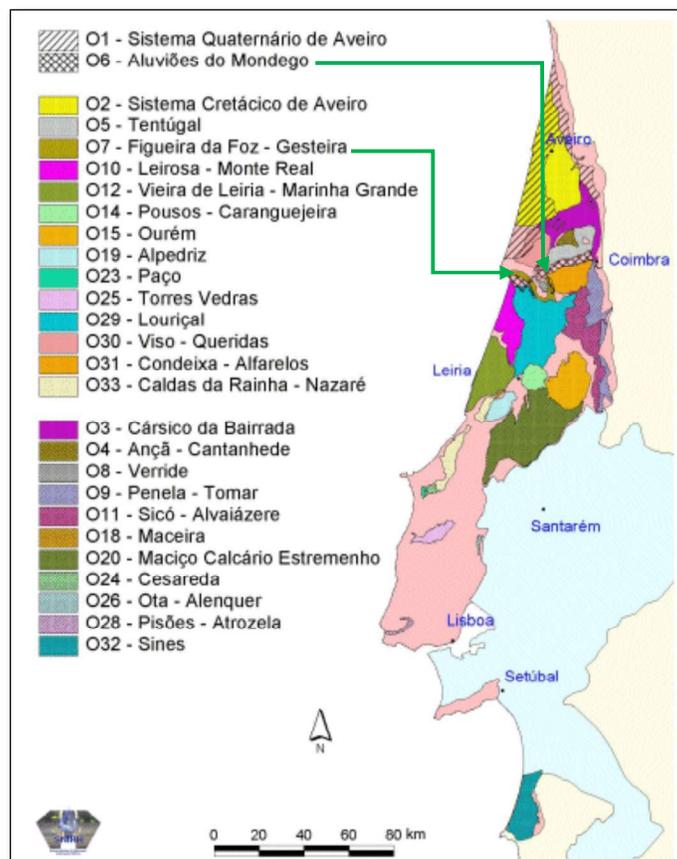
A área em estudo está enquadrada na Unidade Hidrogeológica da Orla Ocidental, especificamente nos Sistemas aquíferos Aluviões do Mondego (06) e Figueira da Foz-Gesteira (07).

Esta Unidade Hidrogeológica é constituída por 33 Sistemas aquíferos (Fig. 3.8) e compreende dois grandes tipos de unidades aquíferas: unidades associadas às formações do Jurássico superior e unidades associadas às Formações do Cretácico.

As Formações do Jurássico superior apresentam condições hidrogeológicas distintas, devido a variações laterais significativas com frequentes intercalações argilosas (Almeida *et al.*, 2000b).

### 3 – Enquadramento Regional

Ainda segundo os mesmos autores as Formações do Cretácico refletem grande variedade nas características dos aquíferos por apresentarem diversas litologias. Assim as formações detríticas apresentam aquíferos porosos, em geral multicamada, livres a confinados, enquanto que os aquíferos associados às formações calcárias e calco-margosas apresentam frequentemente carsificação pouco desenvolvida mas por vezes predominante.



**Figura 3.8** – Unidade Hidrogeológica da Orla Ocidental e respetivos Sistemas aquíferos com indicação dos Sistemas onde se insere a zona em estudo (setas a verde) (SNIRH, 2014).

#### **Sistema aquífero dos Aluviões do Mondego (O6)**

Segundo Almeida *et al.* (2000c), o Sistema aquífero dos Aluviões do Mondego é constituído por areias e areias com seixos e calhaus, com intercalações de argilas e lodos. Lateralmente, passa-se de níveis mais ou menos arenosos para níveis essencialmente argilosos e para a foz do rio Mondego os níveis detríticos mais grosseiros dão lugar a níveis detríticos mais finos com conchas de lamelibrânquios.

Estas alterações sedimentológicas e morfo-climáticas que se verificaram durante a deposição dos aluviões, conferem uma grande irregularidade e complexidade na estratificação. Em localizações com sedimentação lodosa abundante e com matéria orgânica só parcialmente mineralizada, há imensa libertação de gases quando da abertura de furos.

A espessura máxima dos aluviões, até agora atravessada, é da ordem da meia centena de metros, aumenta das margens para a zona axial e de montante para jusante.

O Sistema aquífero, com uma área de 148 km<sup>2</sup>, apresenta como características gerais (Almeida *et al.*, 2000c):

- É muito produtivo e muito poroso, apresenta estrutura multicamada (lenticular) e frequentemente regime livre, como resultado da variabilidade das condições texturais e estruturais no volume aluvionar. O substrato do Sistema é de litologia variada, conforme as localizações onde o rio foi escavando o seu leito.
- A recarga do Sistema faz-se por infiltração direta da precipitação e através de influências de cursos de água superficiais. Estima-se que seja da ordem dos 300mm/ano ou 48hm<sup>3</sup>/ano.
- Admite-se que os Sistemas aquíferos que marginam e se prolongam sobre os aluviões do Mondego tenham descargas ocultas.
- As saídas naturais do sistema ocorrem quando os níveis piezométricos são mais altos no aquífero do que no rio e incluem a água de infiltração direta das precipitações, das descargas dos Sistemas Aquíferos subjacentes e do armazenamento marginal após o período de águas altas nas linhas de água.

#### **Sistema aquífero da Figueira da Foz-Gesteira (07)**

Este Sistema compreende como geologias aquíferas as Formações dos Arenitos do Carrascal (Aptiano-Cenomaniano) e dos Calcários Apinhoados de Costa de Arnes (Cenomaniano-Turoniano inferior). A transição para os Arenitos do Carrascal faz-se através de terrenos com composição margosa e importante componente detrítica o que faz diminuir a permeabilidade e ganhar características de aquitardo (Almeida *et al.*, 2000).

Ainda segundo os mesmos autores, os Aluviões do Mondego, na unidade morfológica do vale do rio Mondego, designada por “garganta de Lares”, e os Aluviões do rio Arunca, no flanco leste do anticlinal de Verride, recobrem o Sistema Aquífero.

Este Sistema apresenta como características gerais (Almeida *et al.*, 2000b):

- É essencialmente poroso, constituído por materiais detríticos e de textura muito variável e estrutura lenticular; as camadas de natureza argilosa separam as várias unidades aquíferas e dão carácter multicamada ao Sistema;

### 3 – Enquadramento Regional

-As fácies químicas da água do aquífero variam entre dois tipos extremos: as cloretadas sódicas e as bicarbonatadas cálcicas; a sul do Mondego o maior número de amostras pertence às águas com predomínio do bicarbonato e do cálcio (Almeida *et al*, 2000b).

- O fluxo subterrâneo é centrífugo relativamente ao núcleo do Anticlinal de Verride;

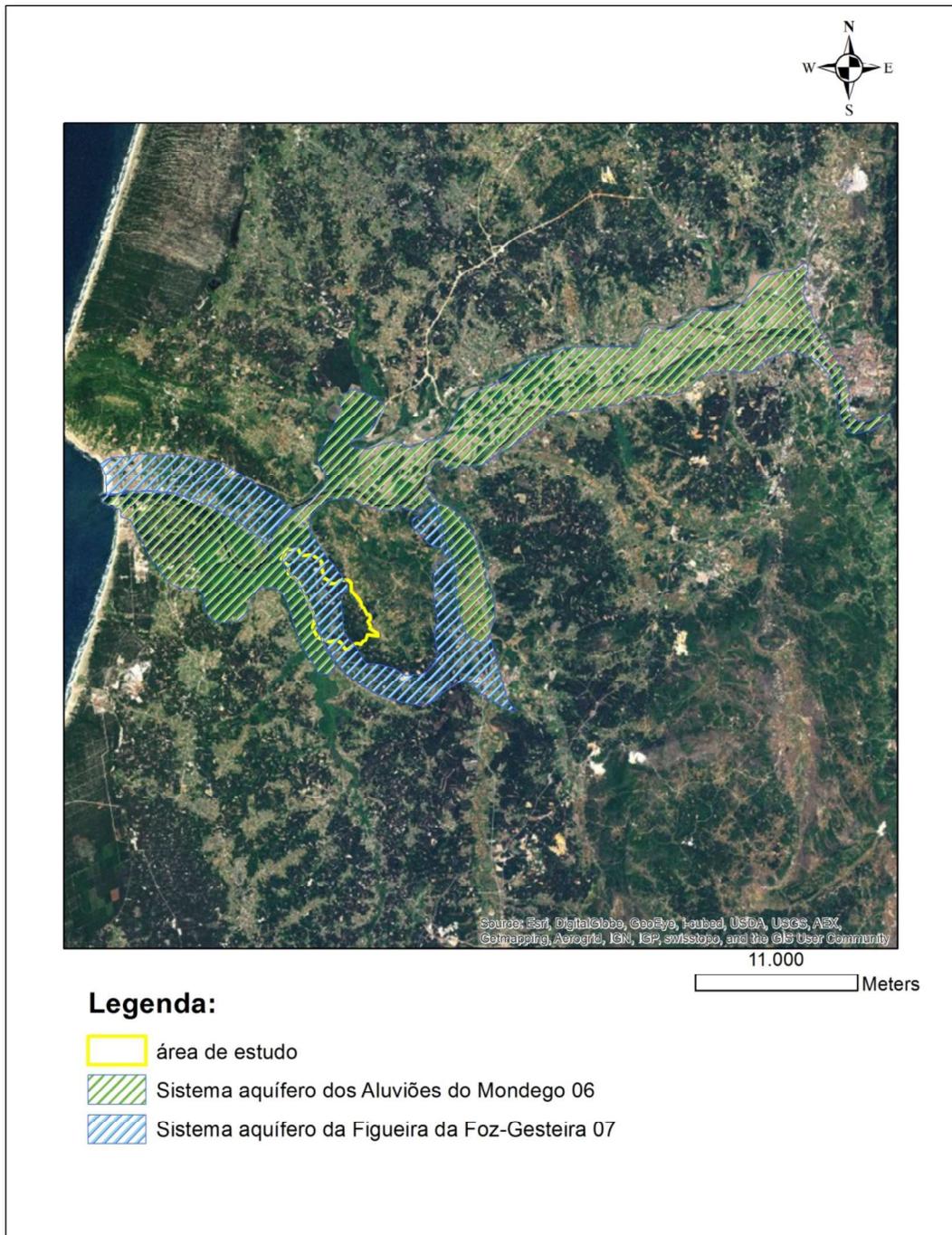
- A recarga faz-se através das precipitações que caem diretamente sobre a superfície aflorante do Sistema aquífero. Estima-se que a recarga direta pela precipitação seja da ordem de 150mm/ano;

- O sistema apresenta regime livre (na parte superficial e/ou zonas altas do aquífero onde se dá a recarga, evoluindo para confinado (são conhecidos furos repuxantes aquando da sua construção);

- A transmissividade média ronda os 118,6 m<sup>2</sup>/dia;

- A produtividade média é de 12,5 l/s;

Na Figura 3.9 estão representados os dois Sistemas aquíferos: Aluviões do Mondego e Figueira da Foz-Gesteira, bem como a área em estudo.



**Figura 3.9** – Área em estudo sobreposta aos Sistemas aquíferos Aluviões do Mondego (06) e Figueira da Foz-Gesteira (07).

## 4 – Enquadramento Local

Neste capítulo são feitos os enquadramentos locais para a área estudada, sendo: (1) Topográfico e Hidrográfico; (2) Geológico e Tectónico e (3) Uso e Ocupação do Solo.

### 4.1 – Topográfico e Hidrográfico

A área de estudo apresenta uma área plana de 11,5 Km<sup>2</sup> e está limitada a norte pela povoação de Moinho de Almocharife, Azenha a sul, Rio Pranto a Oeste, Serro Ventoso e Coles de Samuel a leste (Fig. 4.1). Encontra-se representada nas Cartas Militares do Exército, à escala 1:25000, folhas nº 239 – Figueira da Foz e nº 249 – Marinha das Ondas.

A topografia local caracteriza-se por ser um flanco de vale, á direita do Rio Pranto, com declives moderados e irregulares. Serro Ventoso, a Leste, apresenta-se à cota de cerca de 130 metros, enquanto o sector de Azenha encontra-se a cerca de 3 metros de cota. Casais das Camarinheiras, em ponto central da área, encontra-se à cota de 80 metros. Entre Serro Ventoso, Casais da Camarinheiras e Azenha situa-se um vale mais abrupto, com intensa florestação e na confluência de várias linhas de água.

Em relação à hidrologia, tal como foi descrito no capítulo anterior, a área está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Mondego, nomeadamente na margem direita da sub-bacia do Rio Pranto.

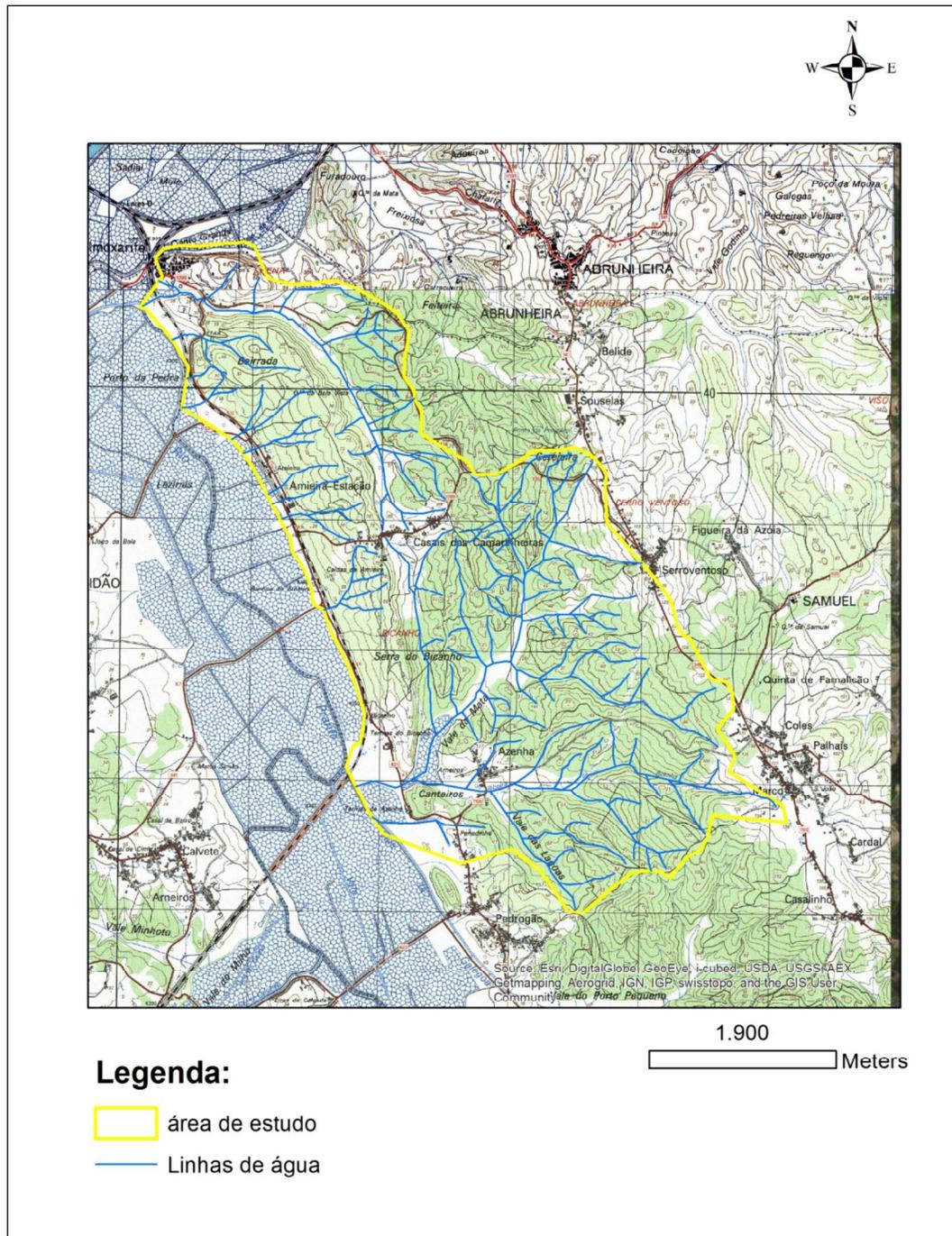


Figura 4.1 – Área em estudo com representação da rede de drenagem (adaptado das Cartas militares nº239 – Figueira da Foz e nº 249 – Marinha das Ondas).

## 4 – Enquadramento Local

### 4.2 – Geológico e Tectónico

#### 4.2.1 – Geológico

No que respeita ao enquadramento geológico, a área em estudo está representada no sector oeste da Carta Geológica de Portugal, folha 19-C Figueira da Foz dos Serviços Geológicos de Portugal à escala 1:50 000. Localiza-se no flanco esquerdo do Anticlinal de Verride e compreende a seguinte sequência litostratigráfica:

##### **a – Aluvião**

Os aluviões são bastante desenvolvidos ao longo do rio Mondego e também ao longo dos principais vales afluentes, tanto da margem esquerda como da margem direita. No presente caso, os depósitos aluvionares correspondem a formações do rio Pranto. São compostos por vários níveis de terra vegetal, lodo castanho e areias de grão fino a médio, do topo para a base (Rocha *et al.*, 1981).

##### **Q<sup>3</sup> – Terraços de 25-40m (Plistocénico)**

O Plistocénico é constituído por tufos calcários e também por vestígios de praias quaternárias e terraços fluviais, representados por areias e cascalheiras. No vale do Rio Pranto observam-se junto de Alqueidão (Rocha *et al.*, 1981).

##### **P – Areias, grés e argilas (Pliocénico)**

O Pliocénico está representado por um complexo de areias, às vezes finas amareladas, com estratificação entrecruzada com seixos de grés argiloso e de argilas. Entre Abrunheira e Serro Ventoso as areias finas amareladas, às vezes com micas, são ravinadas por camadas de arenitos argilosos grosseiros, acastanhados, com seixos, mostrando em corte enchimento de canais. Finalmente, junto do cruzamento das estradas a Sudoeste de Samuel, o Pliocénico situa-se à cota de 137 m. Trata-se de areias argilosas finas, acastanhadas, com seixos miúdos bem rolados e outros maiores (Rocha *et al.*, 1981).

##### **C<sup>4</sup> – Arenitos finos de Lousões (*Emscheriano*)**

Segundo Ferreira Soares *et al.* (2007) esta unidade, com 12±3 m de espessura, é constituída por: na base, arenito fino a muito fino, submaturo a maturo, micáceo, com estruturas laminadas conformes com a estratificação e obliquas de baixo ângulo e cor amarelada e/ou acinzentada. Para o topo, passa a quartzarenito e/ou subarcosarenito grosseiro a muito grosseiro, submaturo, com raro seixo e estrutura obliqua e em ventre. De um modo geral a cor é acastanhada e/ou avermelhada.

### **C<sup>2-3</sup> – Calcários apinhoados da Costa de Arnes (Cenomaniano-Turoniano)**

Constituído por calcário calciclástico compacto, cinzento, coberto por calcários margosos apinhoados cinzentos e com conteúdo fossilífero (Rocha *et al.*, 1981). Ainda segundo os mesmos autores esta formação forma estreitas faixas na zona entre Verride e Soure.

De acordo com Almeida *et al.* (2000b) esta formação apresenta ainda grés calcário e margas com textura concrecionada e com superfície lapiezada. A transição para os Arenitos do Carrascal faz-se através de termos com composição margosa e importante componente detrítica, o que faz diminuir a permeabilidade e ganhar características de aquífero (Figuras 4.2 e 4.3). No campo é possível observar que esta formação tem afloramentos com várias dezenas de metros de comprimento (30 a 50 metros) e com alturas de aproximadamente 10 metros e ainda alguma fracturação



**Figura 4.2** - Aspeto da Formação geológica dos Calcários apinhoados da Costa de Arnes (C<sup>2-3</sup>).

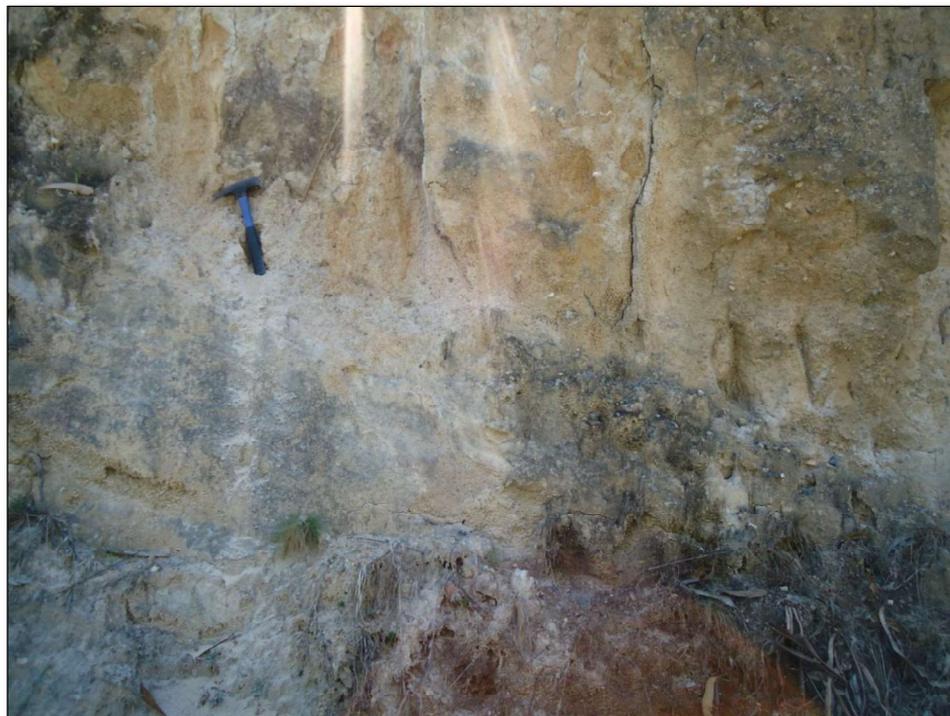


**Figura 4.3** - Aspeto da Formação geológica dos Calcários apinhoados da Costa de Arnes (C<sup>2-3</sup>).

**C<sup>1-2</sup> – Arenitos do Carrascal (*Cretácico inferior a médio*)**

Compreende um corpo detrítico espesso (10-120m), arcosaenito a quartzarenito grosseiro ou muito grosseiro, imaturo a submaturo, esbranquiçado a cinzento, com manchas de oxidação amareladas, avermelhadas ou violáceas e com estrutura interna entrecruzada curvilínea (Figuras 4.4 e 4.5). Presença de corpos discretos de arenitos finos a médios e/ou lutilitos maciços ou laminados, por vezes micáceos e localmente ricos em restos carbonosos e fosseis vegetais (Ferreira Soares, 2007).

Esta formação assenta em discordância sobre as formações do Jurássico. Do ponto de vista granulométrico, a formação apresenta uma diminuição do calibre, da base para o topo (Rocha *et al.*, 1981).



**Figura 4.4** - Aspetos da Formação geológica: Arenitos do Carrascal (C<sup>1-2</sup>).



**Figura 4.5** – Aspetos da Formação geológica dos Arenitos do Carrascal (C<sup>1-2</sup>).

#### 4 – Enquadramento Local

##### J<sup>4-5</sup> – Arenitos da Boa Viagem (*Kimmeridgiano - Portlandiano*)

Trata-se de uma alternância de arenitos argilosos, cujas cores dominantes são o vermelho e o amarelo para os arenitos e amarelo, cinzento e esverdeado para as argilas; a espessura desta unidade é de cerca de 500 a 600 metros. Os arenitos são de grão fino com intercalações de grão médio a grosseiro, com tendência conglomerática (Figuras 4.6 e 4.7). As argilas são plásticas, areníticas e micáceas (Rocha *et al.*, 1981).



**Figura 4.6** - Aspectos gerais da Formação geológica dos Arenitos da Boa Viagem (J<sup>4-5</sup>).



**Figura 4.7** - Aspetos gerais da Formação geológica dos Arenitos da Boa Viagem (J<sup>4-5</sup>).

### **J<sup>3c</sup> Complexo Calco-argilo-arenítico (Kimmeridgiano inferior)**

Este Complexo corresponde a depósitos litorais muito zoogénicos com tendência regressiva na parte superior (presença de carófidas e ostracodos). Este carácter de sedimentação litoral é mais acusado durante o Bajociano-Caloviano; os cefalópodes desapareceram, os lamelibrânquios dominam, os elementos clásticos multiplicam-se nos sedimentos.

No sector de Verride, o Complexo está recortado por numerosas falhas e coberto por formações mais recentes, cretácicas e cenozoicas e é constituído por alternâncias de arenitos finos a grosseiros, de argilas e de calcários mais ou menos margosos, às vezes arenosos, com espessura da ordem de 300 metros a NE de Serro Ventoso (Rocha *et al.*, 1981).

A Tabela 4.1 sintetiza o essencial da geologia presente na área em estudo.

#### 4 – Enquadramento Local

**Tabela 4.1** – Síntese da geologia presente na área em estudo (matriz adaptada de Azevedo, 2008)

<b>Formação Geológica</b>	<b>Cronostratigrafia</b>	<b>Litologia</b>
a - Aluvião	Moderno	Depósitos aluvionares
Q <sub>3</sub> – Terraços 25-40m	Plistocénico	Terraços fluviais
P – Areias, grés e argilas	Pliocénico	Areias com seixos, grés argiloso e argilas
C <sup>4</sup> – Arenito fino de Louções	Cretácico superior	Arenito muito fino na base; quartzarenito no topo
C <sup>2-3</sup> - Calcários apinhoados da Costa de Arnes	Cretácico médio-superior	Calcário compacto a concrecionado, de cor clara
C <sup>1-2</sup> - Arenitos do Carrascal	Cretácico inferior a médio	Corpo detrítico espesso com alternância de arenitos finos e lutitos
J <sup>4-5</sup> - Arenitos da Boa Viagem	Jurássico superior	Alternância de arenitos argilosos e argilas
J <sup>3c</sup> - Complexo Calco-argilo-arenítico	Jurássico superior	Alternâncias de arenitos finos a grosseiros, de argilas e de calcários ± margosos, às vezes arenosos

#### 4.2.2 – Tectónico

Tal como descrito no capítulo anterior existem diversos sistemas de fraturas regionais com orientações preferenciais NNW-SSE; WNW-ESE; e NNE-SSW (Almeida *et al.*, 2000a). Estas orientações das fraturas foram observadas *in situ* em diferentes litologias, sendo em geral evidentes e, nesse sentido procedeu-se à marcação da fracturação mais relevante na área em estudo (Figuras 4.8 e 4.9).



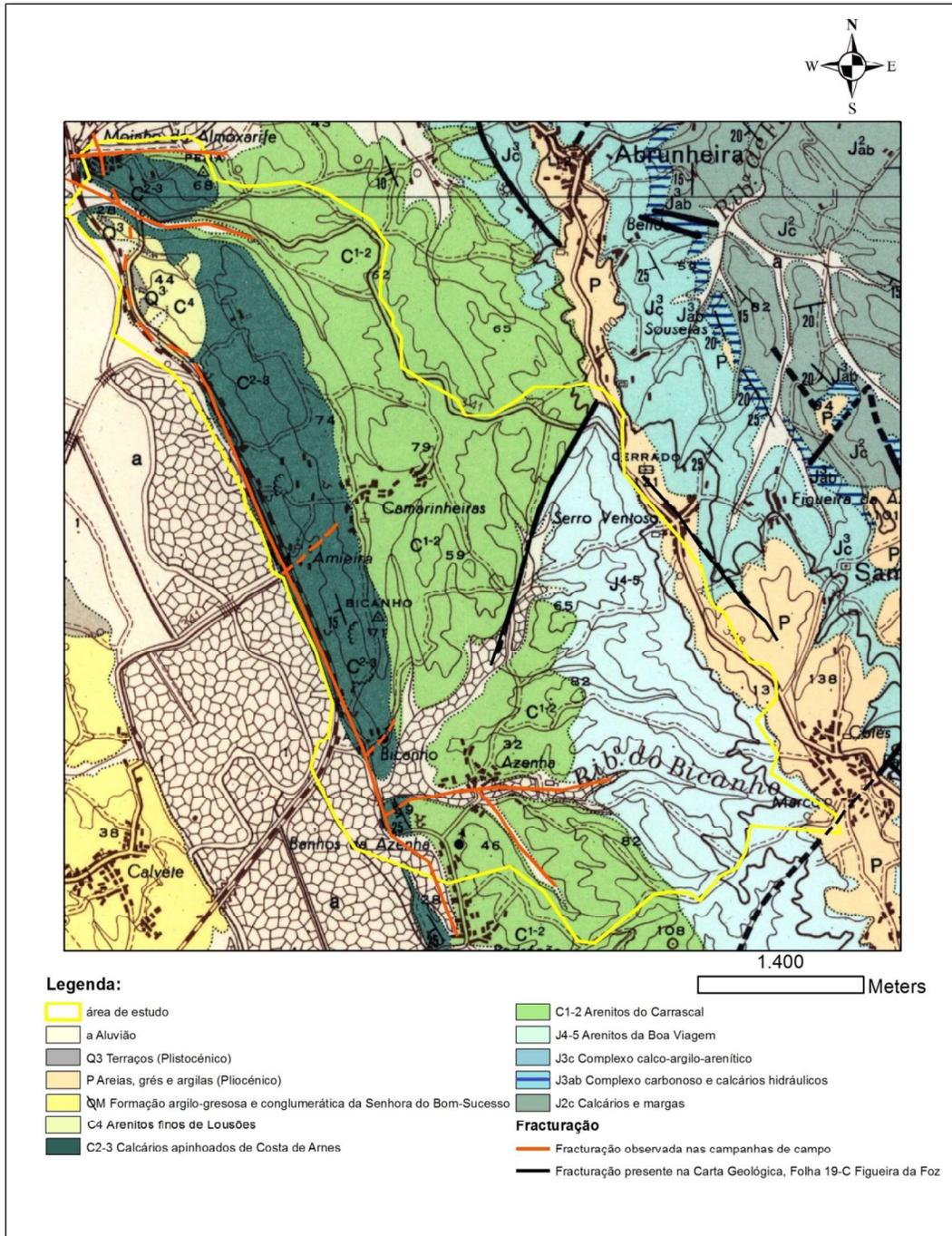
**Figura 4.8** - Zonas de fratura em sector da Formação geológica: Calcários apinhoados da Costa de Arnes (C<sup>2-3</sup>).



**Figura 4.9** - Zonas de fratura em sectores da Formação geológica dos Arenitos do Carrascal (C<sup>1-2</sup>).

#### 4 – Enquadramento Local

Tendo em conta a fracturação presente procedeu-se à marcação desta, adaptando a Carta Geológica de Portugal, folha 19-C Figueira da Foz dos Serviços Geológicos de Portugal à escala 1:50 000 (Fig. 4.10).



**Figura 4.10** – Fracturação existente na área de estudo (adaptado da Carta Geológica de Portugal, folha 19-C Figueira da Foz dos Serviços Geológicos de Portugal, à escala 1:50000).

### 4.3 – Uso e Ocupação do Solo

No que respeita ao uso e ocupação do solo, a área em estudo é predominantemente florestal e com terrenos abandonados (área plana com cerca de 9,1 km<sup>2</sup>), com pequenas zonas urbanizadas (0,6 Km<sup>2</sup>) e agrícola (1,8 km<sup>2</sup>) (Fig. 4.11).

A zona agrícola encontra-se quase sempre circundante à zona urbana e às principais vias de comunicação (estrada nacional 341 e linha de comboio do Oeste). O cultivo é predominantemente de produtos hortícolas e algumas árvores de frutos; ocorrem ainda sectores com pastagem. Os domínios florestais são ocupados com eucaliptais e pinhais.

As fontes potencialmente contaminantes das massas de água superficiais e subterrâneas estarão associadas principalmente às atividades agrícolas e, em menor escala às atividades domésticas. Alguma contaminação industrial poderá decorrer da presença da estação de comboios da Amieira, cuja linha faz transporte de mercadorias e à ocorrência de uma estação de distribuição de combustíveis.

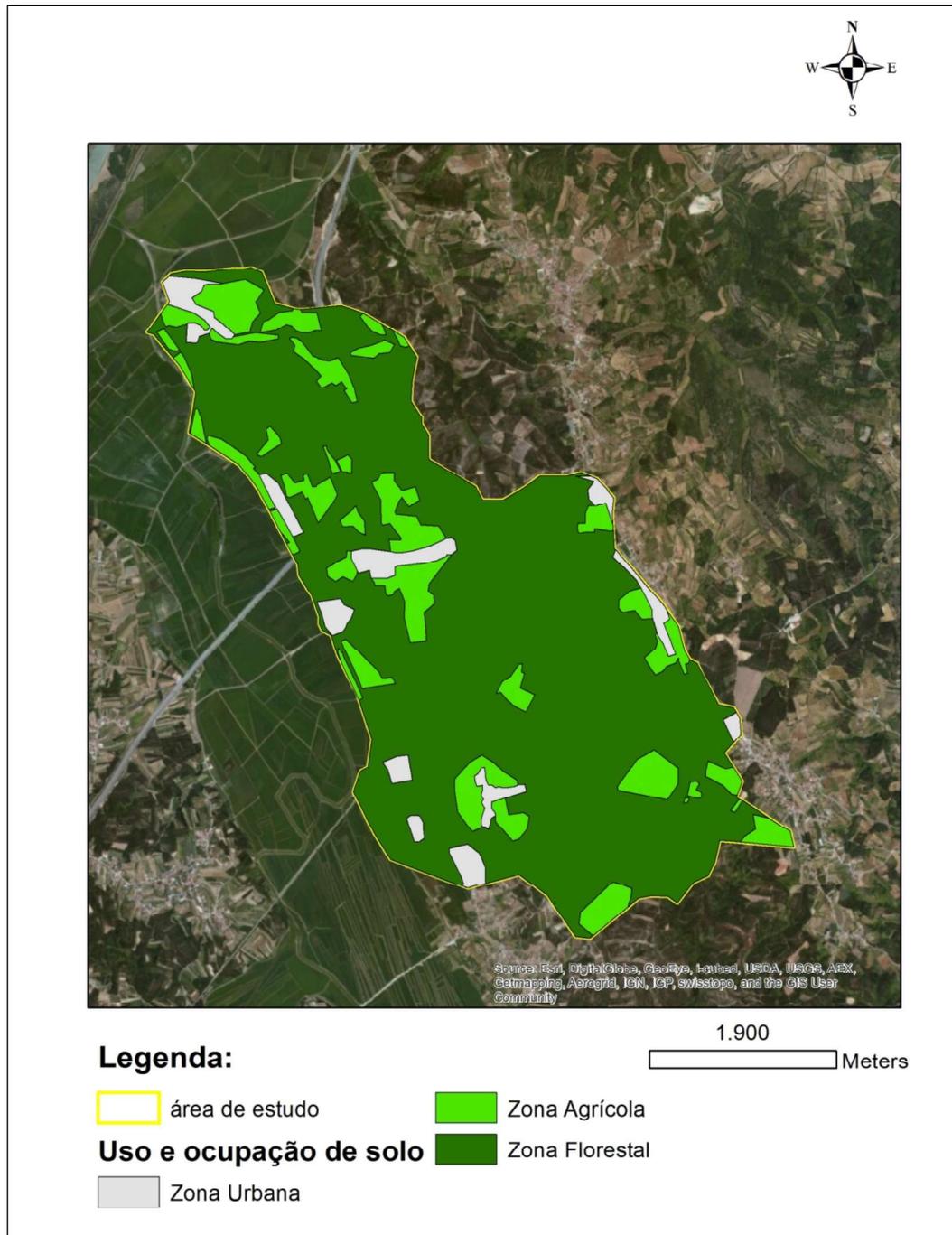


Figura 4.11 – Uso e ocupação do solo na área em estudo.

## 5 – Metodologias utilizadas

Neste capítulo são apresentadas as metodologias usadas nas diversas fases de construção do presente estudo. No geral foram utilizadas: consulta bibliográfica; reconhecimento de campo; análise laboratorial; atividades de gabinete;

### 5.1 – Consulta Bibliográfica

As recolhas bibliográficas foram efetuadas em larga medida na Biblioteca do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra. Contudo, também foram utilizadas outras fontes bibliográficas, pessoais e da Internet. Destacam-se os seguintes apoios bibliográficos:

- De carácter cartográfico e geológico - Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000, folha 19-C Figueira da Foz (Manupella *et al.*, 1976) e a correspondente Notícia Explicativa (Rocha *et al.*, 1981), Notícias Explicativas das Cartas Geológicas de Portugal à escala 1:50000, folhas 19-D Coimbra-Lousã (Ferreira Soares *et al.*, 2007) e 23-A Pombal (Manupella *et al.*, 1978), e as cartas militares de Exército, folhas 239 – Figueira da Foz e 249 – Marinha das Ondas.

- Sobre Radioatividade natural - Correia Marques *et al.* (1979) Neves *et al.* (1996), Pereira (2001), Pereira *et al.* (2003), Neves & Pereira (2004), Gomes *et al.* (2007), Desideri *et al.* (2007), Carvalho *et al.* (2007), Pereira *et al.* (2007), Pereira *et al.* (2009), e Morgado (2011), forneceram bases teóricas de extrema utilidade na conceção desta tese.

- Sobre Hidrologia e Hidrogeologia - Hipólito, J.R. & Vaz, A.C., (2011), Brassington (1998), Azevedo (2008), Azevedo (2012), Custódio & Llamas (1983), Delleur (1999), Fetter (1994), Freeze & Cherry (1979) e Singhal & Gupta (1999).

Foram ainda muito uteis teses de mestrado de Gonçalves (2006), Ferreira (2009) e Campos (2013) e livros como o Dicionário de Geologia (Galopim de Carvalho, A.M., 2011).

### 5.2 – Atividades de campo

O trabalho de campo consistiu em várias deslocações ao local de estudo e em duas campanhas de medição e recolha de amostras de águas subterrâneas locais (a primeira ocorreu no dia 23 de Janeiro de 2013 e a segunda ocorreu no dia 9 de Junho de 2014).

Estas campanhas tiveram como objetivos:

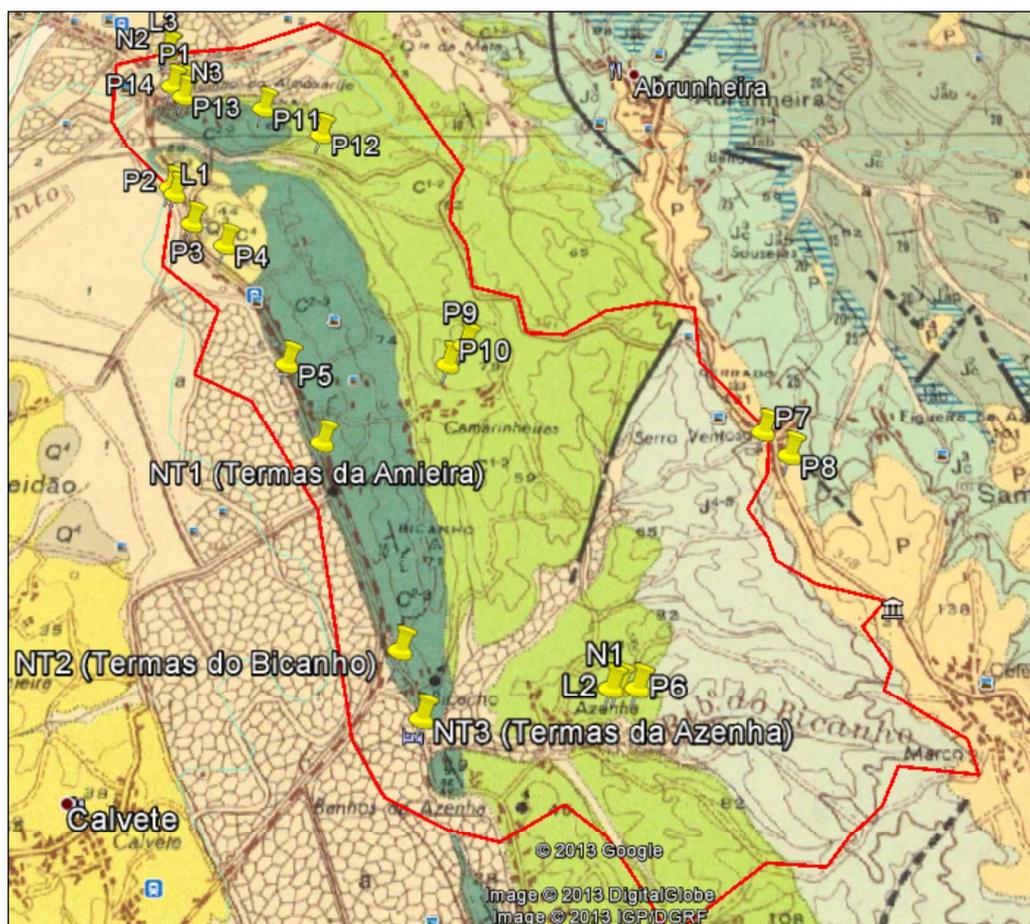
- O reconhecimento geológico-estrutural e a seleção dos pontos de água (poços, nascentes e linha de água).

## 5 - Metodologias

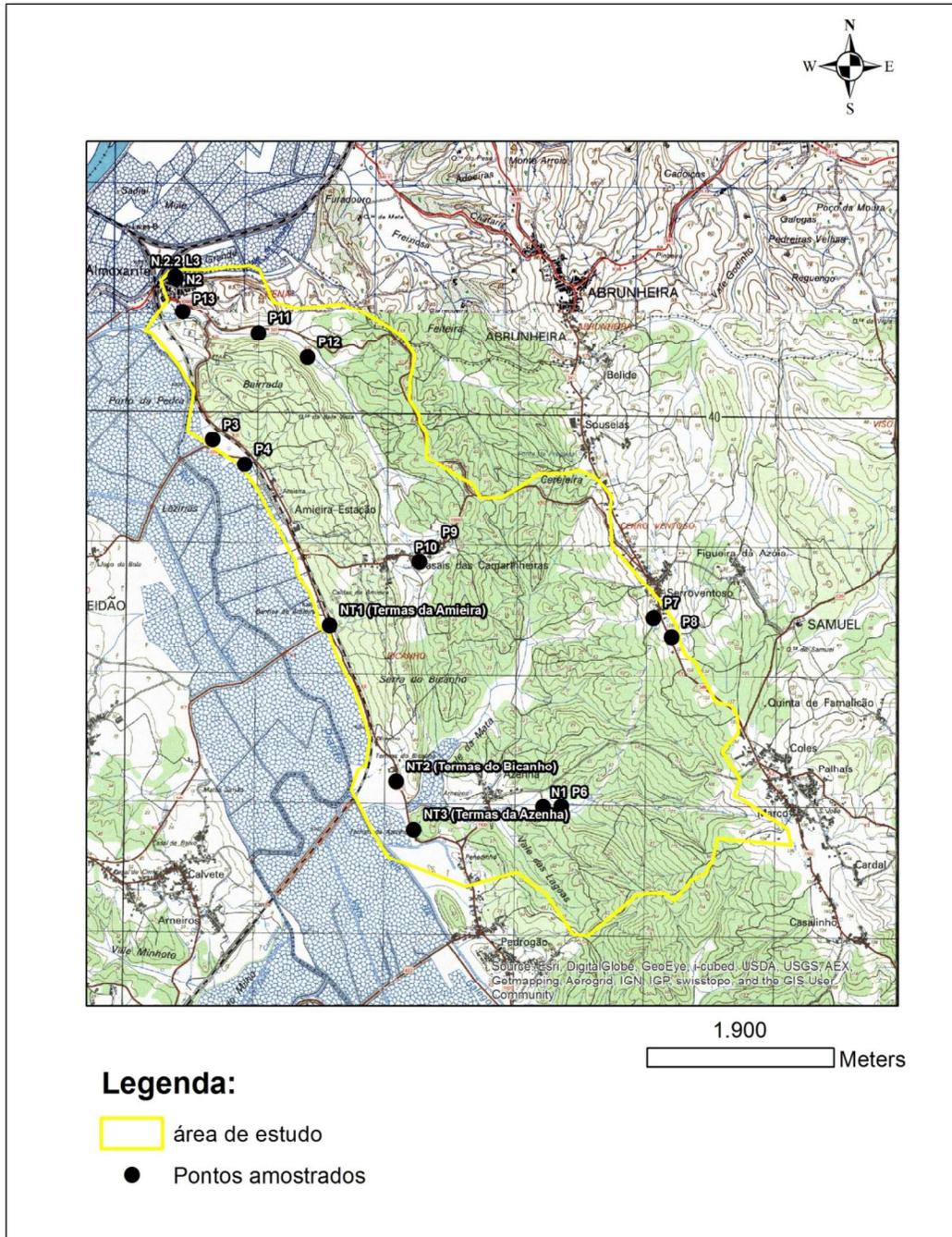
- Medição *in situ* de parâmetros físico-químicos da água amostrada nos diversos pontos de estudo, nomeadamente da: Temperatura, pH e Condutividade elétrica; nos poços foi medida a profundidade da água.

- Recolha de amostras de água para posterior análise no Laboratório de Radioatividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (LRN).

Foram inicialmente reconhecidos 23 pontos de água (Fig. 5.1), dois quais foram selecionados 17 pontos para medição *in situ* e amostragem (Fig. 5.2).



**Figura 5.1** – Área de estudo com indicação dos pontos de água reconhecidos (sobre fragmento da Carta Geológica de Portugal, folha 19-C Figueira da Foz).



**Figura 5.2** – Localização dos pontos de água seleccionados para medições *in situ* e amostragem (sobre fragmento das Cartas Militares do Exército, folhas nº 239 – Figueira da Foz e nº 249 – Marinha das Ondas à escala 1:25.000).

Nas medições *in situ* utilizaram-se os medidores multi-parâmetros WTW Multi 340i, WTW pH330i e WTW Cond330i (Fig. 5.3), da temperatura, pH e condutividade elétrica (C.E.). Na medição da profundidade da água, utilizou-se uma fita métrica e medidor elétrico de níveis “dipper”.



**Figura 5.3** – Equipamentos utilizados para medição *in situ* de parâmetros físico-químicos da água (autor: Azevedo, J.M.M., 2012).

As amostras de água para análise no LRN foram recolhidas com o auxílio de um amostrador tipo “*bailer*” e de um balde, e guardadas em frascos de plástico de 1 litro previamente lavados e armazenados em arca térmica.

No local foram também recolhidas para medição da concentração de radão e, usando uma seringa de plástico com 50ml, amostras em frascos pequenos de 20 ml previamente preparados com 10ml do “cocktail” de cintilação *Betaplate*. “Estes “*vials*” tiveram que ser acondicionados, de forma a não sofrerem alterações térmicas que pudessem comprometer as suas características como sequestradores de radão.

### 5.3 – Análise laboratorial

O trabalho laboratorial da presente tese foi executado no Laboratório de Radioatividade Natural (LRN) do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra e teve como objetivo a determinação das concentrações de radão, urânio e rádio.

#### 5.3.1 – Radão

Previamente à campanha de campo foram preparados os “*vials*” de tampa branca, com 10ml de *Betaplate*. Estes “*vials*” tiveram que ser acondicionados, de forma a não serem sofrerem alterações térmicas que pudessem comprometer as suas características como sequestrador de radão.

Após recolha das amostras nas campanhas de campo (Fig. 5.4), estas estão prontas para medição da concentração no espectrómetro de cintilação líquida ultra-sensível (*Perkin Elmer Quantulus 1220*).



**Figura 5.4** - Recolha das amostras de água para determinação da concentração de radão.

### 5.3.2 – Urânio e Rádio

Na análise destes elementos, começou-se por colocar as amostras recolhidas num funil de decantação, filtrá-las com uma malha de  $0,45\ \mu\text{m}$  e posteriormente à filtração, acidificá-las com ácido nítrico (a 65%) para preservar as suas características químicas.

Para o rádio, coloca-se meio litro de cada amostra em copos de 1 litro e reduz-se até 50ml utilizando uma placa de aquecimento (Fig. 5.5). Após redução coloca-se cada amostra em copos de 50 ml previamente pesados a seco, e pesa-se novamente com amostra. Retira-se 10g de amostra com o auxílio de uma pipeta e de uma balança, coloca-se num “vial” apropriado, devidamente identificado, ao qual se junta 10ml de “cocktail” de cintilação *Betaplate*. Dado que o radio vai ser medido através do radão em equilíbrio isotópico, e esse é atingido 21 dias depois, as amostras foram medidas apenas decorrido esse intervalo de tempo em espectrómetro de cintilação líquida ultra-sensível *Perkin Elmer Quantulus 1220*.



**Figura 5.5** - Tratamento das amostras de rádio em placa de aquecimento.

Para o urânio utiliza-se os restantes meio litro de cada amostra. Coloca-se cada amostra em copos de 1 litro e agita-se durante 10-15 minutos. De seguida colocam-se a amostras em ampolas juntamente com 20ml do “cocktail” de cintilação *Betaplate* e 1 ml de ácido fosfórico. Agita-se e espera-se que se forme uma fase imiscível (15 minutos). Recolhe-se essa fase para um “vial” de tampa vermelha (Fig. 5.6) e procede-se à medição no espectrómetro de cintilação líquida ultra-sensível *Perkin Elmer Quantulus 1220*.



Figura 5.6 - Tratamento das amostras de urânio.

#### 5.4 – Trabalho de Gabinete

Nesta fase efetuou-se o tratamento e integração dos dados da recolha bibliográfica, do reconhecimento e medições de campo e, das análises laboratoriais. Utilizaram-se diversos programas informáticos, como por exemplo:

- *ArcGis* (software de sistemas de informação geográficos) para realização de diversas cartas aqui presentes;
- *Microsoft Office* para escrita da presente tese;

Foram utilizados ainda as seguintes ferramentas informáticas:

- *Google Earth*
- Plataformas, com utilizações variadas, como por exemplo o *Geoportal*, *GEOLEX* e *HI-DROLEX* do LNEG, disponível em <http://geoportal.lneg.pt/>

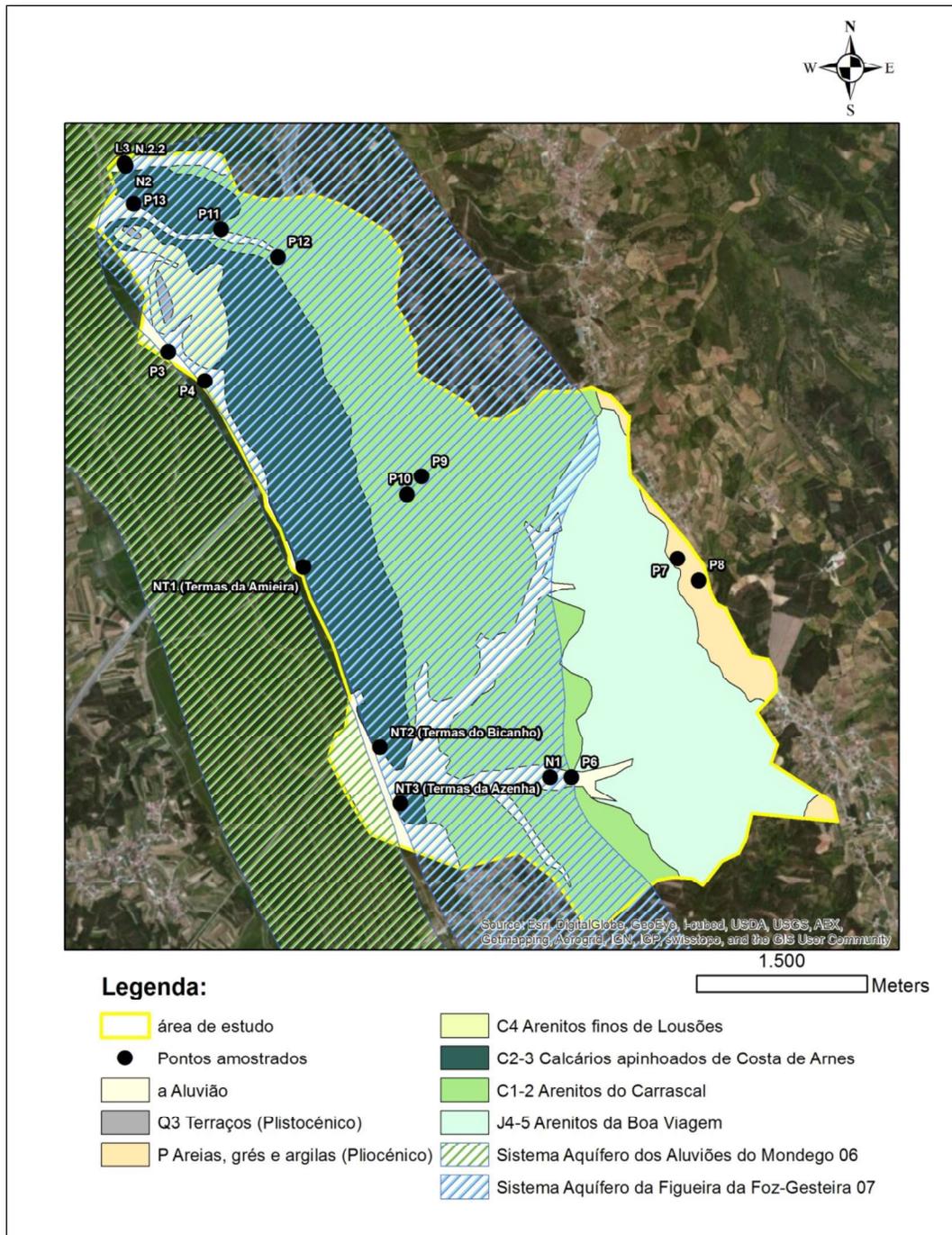
## 6 – Caracterização Hidrogeológica

Neste capítulo apresentam-se os resultados das observações e medições físico-químicas *in situ* efetuadas nas duas campanhas de campo, realizadas em Janeiro e Junho, assim como a caracterização e classificação hidrogeológica das Formações geológicas presentes. Termina-se o capítulo com a definição de um modelo hidrogeológico conceptual simplificado para a área em estudo.

### 6.1 – Pontos de água selecionados e medições *in situ*

Dos pontos e linhas de água reconhecidos na zona (23), foram selecionados 17 pontos de amostragem (Fig. 6.1) tendo em conta:

- Proximidade às três termas existentes no local, primeiramente consideradas para o estudo da presente Tese, sendo estas Termas da Amieira, Termas do Bicanho e Termas da Azenha;
- A boa distribuição na área em estudo;
- A inserção nas várias Formações geológicas e Sistemas Aquíferos existentes na área;
- A proximidade às três nascentes hidrotermais existentes no local – Termas da Amieira, Termas do Bicanho e Banhos da Azenha;
- A facilidade para aceder ao ponto e à água;



**Figura 6.1** – Pontos amostrados na área de estudo inseridos nos Sistemas Aquíferos Aluviões do Mondego (06) e Figueira da Foz-Gesteira (07).

A delimitação da área de estudo considerou os critérios supracitados e também a rede hidrográfica local, uma vez que esta terá influência relevante no enquadramento hidrogeológico local. Os pontos de água selecionados (Tabela 6.1) incluem:

- Nascentes termais (NT) – 3;
- Nascentes não-termais (N) – 3;

## 6 – Caracterização Hidrogeológica

- Poços (P) – 10;
- Linhas de água (L) – 1.

**Tabela 6.1** – Características gerais dos pontos estudados;(- não determinado).

Ponto de Água	Localização (UTM WGS84 29N)		Cota de superfície * (m)	Profundidade da água (m)	
				Janeiro	Junho
NT1	521565.95 m E	4438369.04 m N	6	0,00	0,00
NT2	522049.56 m E	4437251.79 m N	6	1,00	1,00
NT3	522224.52 m E	4436782.61 m N	6	3,57	4,00
N1	523232.48 m E	4436960.65 m N	12	0,00	0,00
N2	520361.08 m E	4441060.25 m N	6	0,00	0,00
N2.2	520355.42 m E	4441070.86 m N	6	0,56	0,56
L3	520354.21 m E	4441076.81 m N	3	0,50	0,50
P3	520650.42 m E	4439809.40 m N	6	0,00	-
P4	520899.60 m E	4439616.93 m N	6	0,25	0,45
P6	523374.57 m E	4436962.94 m N	12	0,00	0,80
P7	524086.68 m E	4438432.66 m N	119	1,80	1,26
P8	524230.02 m E	4438287.67 m N	125	1,97	-
P9	522359.42 m E	4438979.80 m N	80	1,80	4,78
P10	522263.49 m E	4438861.28 m N	78	1,34	4,28
P11	521005.53 m E	4440637.44 m N	18	0,78	1,26
P12	521389.59 m E	4440452.75 m N	20	0,30	1,12
P13	520414.81 m E	4440805.25 m N	7	0,00	0,00

(\*) Valor obtido a partir da Carta Militar do Exército, folhas 239 – Figueira da Foz e 249 – Marinha das Ondas.

Com a exceção de P7 e P8, os pontos amostrados inserem-se nos Sistemas aquíferos dos Aluviões do Mondego e de Figueira da Foz-Gesteira (O7), e implantam-se nas Formações geológicas:

- Aluvião – N1; P3; P4, P6; P13; L3
- Calcários apinhoados da Costa de Arnes – NT1; NT2; NT3
- Arenitos do Carrascal – P9; P10 P11; P12; N2; N2.2

O ponto P7 implanta-se sobre as formações geológicas Areias, Grés e Argilas (P) /Arenitos da Boa Viagem (J<sup>4-5</sup>) e P8 sobre Areias, Grés e Argilas (P) /Complexo Complexo Calco-argilo-arenítico (J<sup>3c</sup>).

## **6.2 – Caracterização e Classificação Hidrogeológicas**

Em função dos elementos apresentados nos Capítulos 3 e 4, nomeadamente nos elementos de natureza geomorfológica, geológica e estrutural, efetuou-se a caracterização e classificação hidrogeológicas das diversas formações locais. Na Tabela 6.2 apresenta-se a classificação hidrogeológica geral.

## 6 – Caracterização Hidrogeológica

**Tabela 6.2** - Matriz de caracterização e classificação hidrogeológicas das diversas Formações geológicas que ocorrem na área em estudo (Valores da Porosidade e da Condutividade hidráulica retirados da bibliografia especializada (\*); matriz adaptada de Azevedo, 2008).

<b>Formação/ Unidade geológica</b>	<b>Porosidades (%) n=total ne=eficaz</b>	<b>Condutividade hidráulica (K) (m/d)</b>	<b>Classificação Hidrogeológica</b>
<b>a</b> - Aluvião	n= 30 a 40 %; ne= 20 a 35%	1 a 500	Aquífero não-confinado
<b>P</b> - Areias, grés e argilas	Níveis arenosos: n= 10 a 30%; ne= 5 a 25% Níveis conglomeráticos: n=5 a 30 %; ne=0 a 20% Níveis argilosos: n= 45 a 60%; ne=0 a 10%	Níveis arenosos: 1 a 500 Níveis conglomeráticos: $10^{-4}$ a $10^{-1}$ Níveis argilosos: $<10^{-2}$	Níveis arenosos: Aquífero não confinado Níveis argilosos: Aquitardo a aquícluso
<b>C<sup>2-3</sup></b> - Calcários apinhoados da Costa de Arnes	Níveis compactos: n= 0,1 a 5%; ne=0 a 1% Níveis apinhoados: n=5 a 30% ne=5 a 20%	Níveis apinhoados: $10^{-5}$ a $10^{-1}$ Níveis compactos: $<10^{-2}$	Níveis fraturados e/ou carsificados: Aquífero semi-confinado a confinado Níveis compactos e/ou margosos: Aquitardo a aquícluso
<b>C<sup>1-2</sup></b> - Arenitos do Carrascal	Níveis areníticos: n= 5 a 30%; ne=0 a 20 % Níveis argilosos: n=45 a 60%; ne=0 a 10%	Níveis areníticos: $10^{-4}$ a $10^{-1}$ Níveis argilosos: $<10^{-2}$	Níveis areníticos: Aquífero semiconfinado a confinado Níveis argilosos: Aquitardo a aquícluso;
<b>J<sup>4-5</sup></b> - Arenitos da Boa Viagem	Níveis areníticos: n= 5 a 30%; ne= 5 a 25% Níveis argilosos: n=45 a 60%; ne=0 a 10%	Níveis areníticos: $10^{-4}$ a $10^{-1}$ Níveis argilosos: $<10^{-2}$	Níveis areníticos: Aquífero semiconfinado a confinado Níveis argilosos: Aquitardo a aquícluso

(\*) Valores indicados na bibliografia especializada e de referência (Azevedo, 2012; Brassington, 1998; Custódio & Llamas, 1983; Decreto-Lei 382/99; Delleur, 1999; Fetter, 1994; Freeze e Cherry, 1979; Singhal & Gupta, 1999).

Nas Tabelas seguintes (Tabelas 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7) Definem-se as características das diversas unidades aquíferas definidas na Tabela 6.2 e que ocorrem no local de estudo.

**Tabela 6.3** - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: **a** – Aluvião (matriz adaptada de Azevedo, 2008).

Característica/parâmetro	Unidade aquífera: <b>a - aluvião</b>
Dimensão (na área em estudo)	Área: 1,4 km <sup>2</sup> ; perímetro: 25,1 km
Litologia	Areias e areias conglomeráticas
Circulação intra-aquífera	Aproximadamente paralela à linha de água associada
Recarga aquífera	Processos: a partir da precipitação atmosférica e da infiltração; Locais: ao longo da superfície aflorante e a partir do leito e margens
Descarga aquífera	Drenagem para as linhas de água e para os aluviões do Rio Mondego a cota inferior Drenância para outras unidades aquíferas Captação em poços e furos
Tipo de aquífero (segundo o DL382/99)	Tipo 2 — aquífero livre, cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

**Tabela 6.4** - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: **P** – Areias, grés e argilas (matriz adaptada de Azevedo, 2008).

Característica/parâmetro	Unidade aquífera: <b>P - Areias, grés e argilas</b>
Dimensão (na área em estudo)	Área: 0,3 km <sup>2</sup> ; perímetro: 5,3 km
Litologia	Areias com seixos, grés argilosos e argilas
Circulação intra-aquífera	Não determinada
Recarga aquífera	Processos: precipitação atmosférica e infiltração associada Locais: superfície aflorante
Descarga aquífera	Drenagem para nascentes Drenância para unidades aquíferas subjacentes Captação de água em poços e furos
Tipo de aquífero (segundo o DL382/99)	Tipo 2 — aquífero livre, cujo suporte litológico é constituído por formações porosas;

## 6 – Caracterização Hidrogeológica

**Tabela 6.5** – Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: C<sup>2-3</sup> Calcários apinhoados da Costa de Arnes (matriz adaptada de Azevedo, 2008).

Característica/parâmetro	Unidade aquífera: <b>C<sup>2-3</sup> - Calcários Apinhoados da Costa de Arnes</b> (níveis apinhoados e fraturados)
Dimensão (na área em estudo)	Área: 2.2km <sup>2</sup> ; perímetro: 13,4 km
Litologia	Calcários calciclásticos
Circulação intra-aquífera	Fluxo centrífugo relativamente ao núcleo do anticlinal de Verride (situado a NE), neste caso a circulação efetua-se de NE para SW
Recarga aquífera	Processos: por precipitação e infiltração Locais: superfície aflorante e nos contactos com outras unidades aquíferas
Descarga aquífera	Drenagem para as linhas de água próximas e para nascentes locais Drenância para unidades aquíferas subjacentes Captações em furos
Tipo de aquífero (segundo o DL382/99)	Tipo 4 - aquífero cujo suporte litológico é constituído por formações carbonatadas

**Tabela 6.6** - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: C<sup>1-2</sup> Arenitos do Carrascal (matriz adaptada de Azevedo, 2008).

Característica/parâmetro	Unidade aquífera: <b>C<sup>1-2</sup> - Arenitos do Carrascal</b>
Dimensão (na área em estudo)	Área: 4,7 km <sup>2</sup> ; Perímetro: 23,8 km
Litologia	Corpo detrítico espesso arcossarenítico a quartzarenítico grosseiro ou muito grosseiro
Circulação intra-aquífera	Semelhante à unidade aquífera dos Calcários apinhoados da Costa de Arnes
Recarga aquífera	Processos: por precipitação e infiltração Locais: superfície aflorante, nos contactos com outras unidades hidrogeológicas e a partir de linhas de água
Descarga aquífera	Drenagem para nascentes, incluindo as hidrotermais Drenância para unidades aquíferas subjacentes Captação em poços e furos
Tipo de aquífero (segundo o DL382/99)	Tipo 1 e 3 — aquífero semiconfinado a confinado, cujo suporte litológico é constituído por formações porosas

**Tabela 6.7** - Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera: J<sup>4-5</sup> Arenitos da Boa Viagem (matriz adaptada de Azevedo, 2008).

Característica/parâmetro	Unidade aquífera: J <sup>4-5</sup> - Arenitos da Boa Viagem
Dimensão (na área em estudo)	Área: 2,5 km <sup>2</sup> ; perímetro: 10,3 km
Litologia	Arenitos argilosos de grão fino, com intercalações de grão médio a grosseiro
Circulação intra-aquífera	Fluxo centrífugo relativamente ao núcleo do anticlinal de Verride (situado a nordeste), neste caso a circulação efetua-se de nordeste para sudoeste
Recarga aquífera	Processos: por precipitação e infiltração Drenância a partir de unidades aquíferas superiores Locais: superfície aflorante e no contacto com outras unidades aquíferas e linhas de água
Descarga aquífera	Drenagem para nascentes, incluindo as hidrotermais Drenância para unidades aquíferas subjacentes Captação em poços e furos
Tipo de aquífero (segundo DL382/99)	Tipo 1 e 3 — aquífero semi-confinado a confinado, cujo suporte litológico é constituído por formações porosas

### 6.3 – Modelo Hidrogeológico Conceptual

Os conhecimentos da hidrogeologia regional, nomeadamente dos dois Sistemas aquíferos que evoluem na área em estudo - Aluviões do Mondego (06) e Figueira da Foz-Gesteira (07), conjugados com os conhecimentos adquiridos ao longo da realização da presente tese, permitem estabelecer o seguinte modelo hidrogeológico conceptual para o sector em análise (Fig. 6.2):

- Ocorrência de várias unidades aquíferas (Tabelas 6.2 a 6.7), nomeadamente, unidades com regime não-confinado e unidades confinadas a semi-confinadas;
- Os aquíferos não-confinados e freáticos evoluem em meio poroso, nomeadamente nos depósitos de Aluvião (a) e Areias, Grés e Argilas (P); na Formação dos Arenitos de Carrascal (C<sup>1-2</sup>) também ocorre um aquífero freático (como exemplificam os poços P9 e P10);
- Nas Formações dos Arenitos do Carrascal (C<sup>1-2</sup>) e dos Arenitos da Boa Viagem (J<sup>4-5</sup>), nomeadamente nos níveis mais grosseiros (areníticos e conglomeráticos), ocorrem unidades

## 6 – Caracterização Hidrogeológica

aquíferas confinadas a semi-confinadas; estas unidades estão limitadas superior e inferiormente pelos níveis argilíticos e siltíticos;

- No conjunto das unidades aquíferas confinadas destaca-se a existência de uma, de natureza termal, testemunhada pelas exurgências das Termas da Amieira, Bicanho e Banhos das Azenha; este aquífero situar-se-á nos níveis mais profundos da Formação cretácica dos Arenitos do Carrascal, não sendo de excluir a possibilidade de evoluir para a Formação dos Arenitos da Boa Viagem (J<sup>4-5</sup>);

- A localização dos três pontos de descarga superficial deste aquífero está condicionada pela ocorrência de uma fratura regional com orientação N25°W; os locais de descarga resultam da interceção desta fratura principal com fraturas de menos expressão da família N45°E para as Termas da Ameira e Bicanho e N80°E para os Banhos da Azenha;

- A recarga das diversas unidades aquíferas locais resulta principalmente da precipitação atmosférica e da infiltração profunda nas superfícies aflorantes das formações aquíferas; as linhas de água, sobretudo as que com regime perene, também intervêm no processo de recarga durante os meses de inverno; nos aquíferos mais profundos a recarga resulta igualmente da drenância a partir das unidades superiores;

- A descarga das diversas unidades aquíferas identificadas (Tabelas 6.2 a 6.7) efetua-se por processos naturais, através de nascentes “frias” e termais (Amieira, Bicanho e Azenha), por evapotranspiração, nomeadamente nos aquíferos freáticos, e por libertação de água subterrânea para a rede de drenagem, particularmente nos meses de Verão, e por processos induzidos – através de captações de água em poços e furos.

Na figura 6.3 apresenta-se um perfil interpretativo da geologia e da hidrodinâmica subterrânea existentes na área em estudo, nomeadamente entre as Termas da Amieira e a povoação de Serro Ventoso.

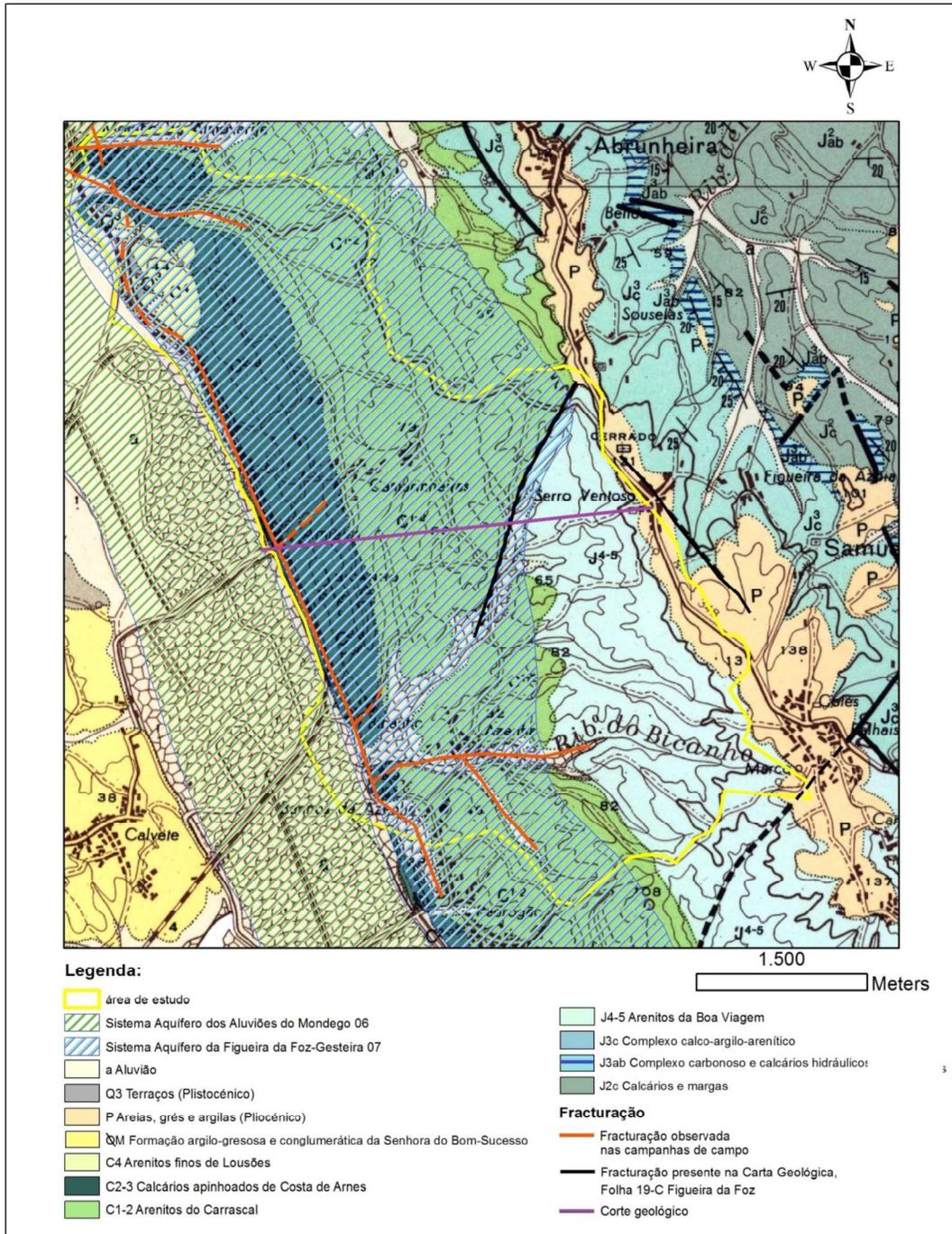


Figura 6.2 – Enquadramento geológico e hidrológico com indicação do perfil realizado.

6 – Caracterização Hidrogeológica

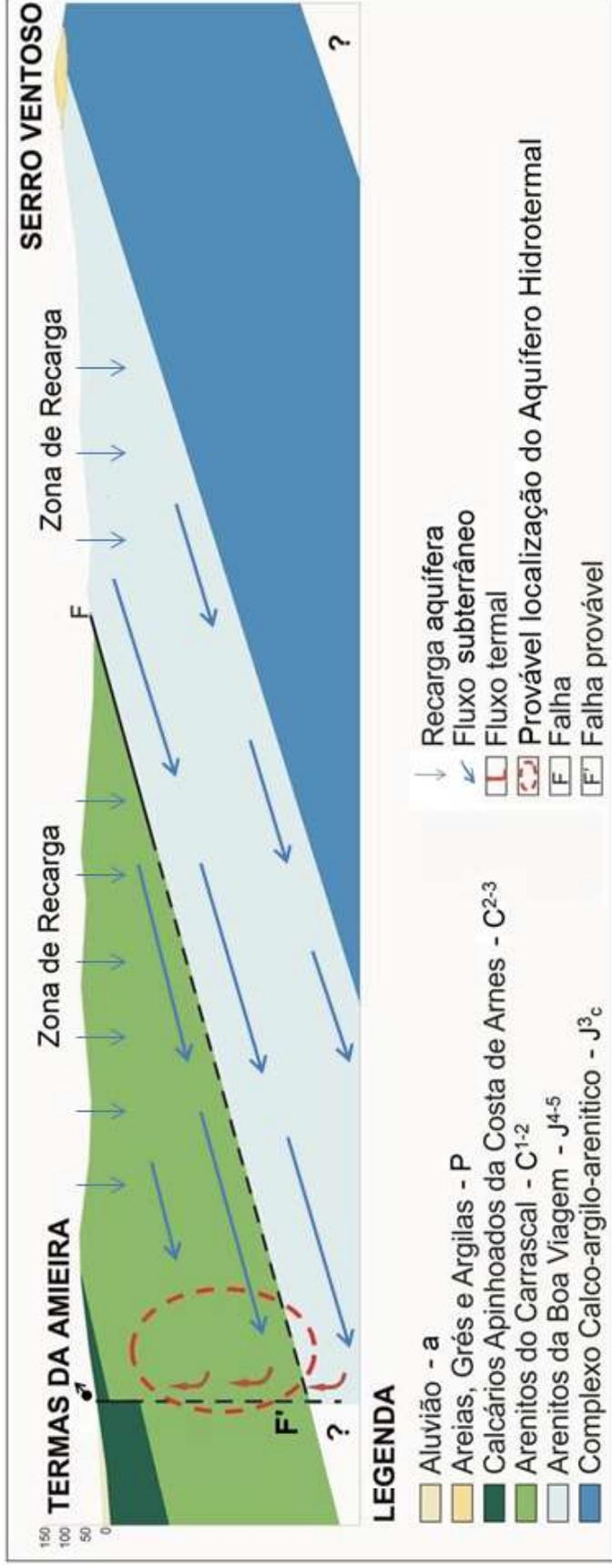


Figura 6.3 – Perfil com orientação N80°E interpretativo da geologia e hidrogeologia da área em estudo (modelo conceptual).

## 7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

Neste capítulo é feita a análise dos parâmetros físico-químicos medidos no campo e dos radiológicos determinados em laboratório de amostras de água colhidas na área em estudo. São apresentados e interpretados primeiramente os dados relativos aos parâmetros físico-químicos medidos *in situ*. Seguidamente são analisados os parâmetros radiológicos determinados em laboratório, sendo estes relativos às concentrações de radão, rádio e urânio. Será também apresentado, como complemento a estes dados, o cálculo da dose efetiva descrita anteriormente.

### 7.1 – Parâmetros físico-químicos *in situ*

#### 7.1.1 – Temperatura

Na Tabela 7.1 apresentam-se os resultados obtidos nas duas campanhas de campo.

**Tabela 7.1** – Resultados das medições *in situ* da Temperatura da água (°C; - não determinado).

Pontos de água	Temperatura (°C)	
	Janeiro	Junho
NT1	24,80	26,80
NT2	26,30	27,10
NT3	24,90	27,80
N1	15,30	17,50
N2	12,10	20,60
N2.2	14,50	18,30
L3	10,20	21,50
P3	13,60	-
P4	14,70	22,40
P6	11,20	19,20
P7	12,20	20,40
P8	13,70	-
P9	15,60	17,80
P10	15,20	17,80
P11	12,80	21,30
P12	12,20	18,30
P13	12,10	22,40

A Tabela 7.2 sintetiza os resultados do tratamento estatístico dos registos da Temperatura, apresentados na Tabela anterior.

**Tabela 7.2** – Tratamento estatístico da Temperatura (°C) nas campanhas de campo.

Parâmetros estatísticos	Temperatura (°C)	
	Janeiro	Junho
Mínimo (nascentes termais)	24,80	26,80
Máximo (nascentes termais)	26,30	27,80
Mínimo (pontos de água fria)	10,20	18,30
Máximo (pontos de água fria)	15,30	22,40
Média (nascentes termais)	25,30	27,20
Média (pontos de águas frias)	13,20	19,80
Mediana (nascentes termais)	24,90	27,10
Mediana (pontos de água fria)	13,20	19,80
Desvio padrão (nascentes termais)	0,80	0,50
Desvio padrão (pontos águas frias)	1,70	1,90
Coeficiente de Variação (nascentes termais)	0,00	0,00
Coeficiente de Variação (pontos de águas frias)	0,10	0,10

Do conjunto de resultados apresentados nas Tabelas 7.1 e 7.2, pode concluir-se:

- Ocorre uma clara distinção entre os valores das águas subterrâneas amostradas nas nascentes “frias” e poços e os valores das nascentes termais, quer em termos absolutos quer ao nível da evolução ao longo do ano hidrológico;
- Em relação às nascentes termais, as Termas da Amieira (NT1) apresentam os valores mais baixos nas campanhas de Janeiro e Junho, de 24,8°C e 26,8°C, respetivamente; o valor máximo obtido em Janeiro corresponde ao ponto de água NT2 (Termas do Bicanho), de 26,3°C, enquanto que o valor máximo obtido em Junho corresponde ao ponto de água NT3 (Termas da Azenha).
- Para os pontos de águas frias, amostrados em Janeiro, o valor mínimo obtido é de 10,2°C e de 15,6°C para o valor máximo. Em Junho o valor mínimo é de 18,3°C e máximo de 22,4°C;
- A evolução das Temperaturas registadas em Junho sofre um aumento médio de alguns graus, em redor de 2°C para as nascentes hidrotermais e, 6,5°C para os pontos de águas “frias”;
- No que concerne aos pontos de águas frias, as Temperaturas registadas para a linha de água L3 mostram que em Janeiro registou o valor mais baixo, de 10,2°C e em Junho um dos

mais altos, de 21,5°C. Os poços P13, P4, P11 e P7 registam uma amplitude térmica maior que nos outros poços. P9 e P10 registam a menor amplitude térmica, inferior a 3°C. As nascentes “frias” N1, N2 e N2.2 registam valores para a Temperatura, semelhantes aos poços analisados.

### 7.1.2 – Condutividade elétrica

Na Tabela seguinte (Tabela 7.3) apresentam-se os valores recolhidos para cada ponto de água.

**Tabela 7.3** – Resultados das medições *in situ* da Condutividade Elétrica – C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; - não determinado).

Ponto de água	Condutividade elétrica – CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	
	Janeiro	Junho
NT1	1227,00	1521,00
NT2	980,00	1025,00
NT3	481,00	950,00
N1	117,00	154,00
N2	587,00	760,00
N2.2	549,00	825,00
L3	297,00	415,00
P3	920,00	-
P4	741,00	1015,00
P6	585,00	1056,00
P7	368,00	138,00
P8	319,00	-
P9	440,00	680,00
P10	223,00	320,00
P11	527,00	490,00
P12	479,00	630,00
P13	585,00	785,00

A Tabela 7.4 sintetiza os resultados do tratamento estatístico dos registos da Condutividade elétrica, apresentados na Tabela anterior.

**Tabela 7.4** - Tratamento estatístico da Condutividade elétrica – C.E. ( $\mu\text{S/cm}$ ) nas campanhas de campo.

Parâmetros estatísticos	Condutividade elétrica – CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	
	Janeiro	Junho
Mínimo (nascentes termais)	481,00	950,00
Máximo (nascentes termais)	1227,00	1521,00
Mínimo (pontos de água fria)	117,00	154,00
Máximo (pontos de água fria)	920,00	1051,00
Média (nascentes termais)	896,00	1165,00
Média (pontos de águas frias)	481,00	606,00
Mediana (nascentes termais)	980,00	1025,00
Mediana (pontos de água fria)	503,00	655,00
Desvio padrão (nascentes termais)	380,00	310,00
Desvio padrão (pontos águas frias)	210,00	306,00
Coefficiente de Variação (nascentes termais)	0,40	0,30
Coefficiente de Variação (pontos de águas frias)	0,40	0,50

Nas figuras seguintes (Fig. 7.1 e 7.2) apresenta-se as distribuições dos valores registados para a Condutividade elétrica nos pontos de água medidos nas duas campanhas de campo.

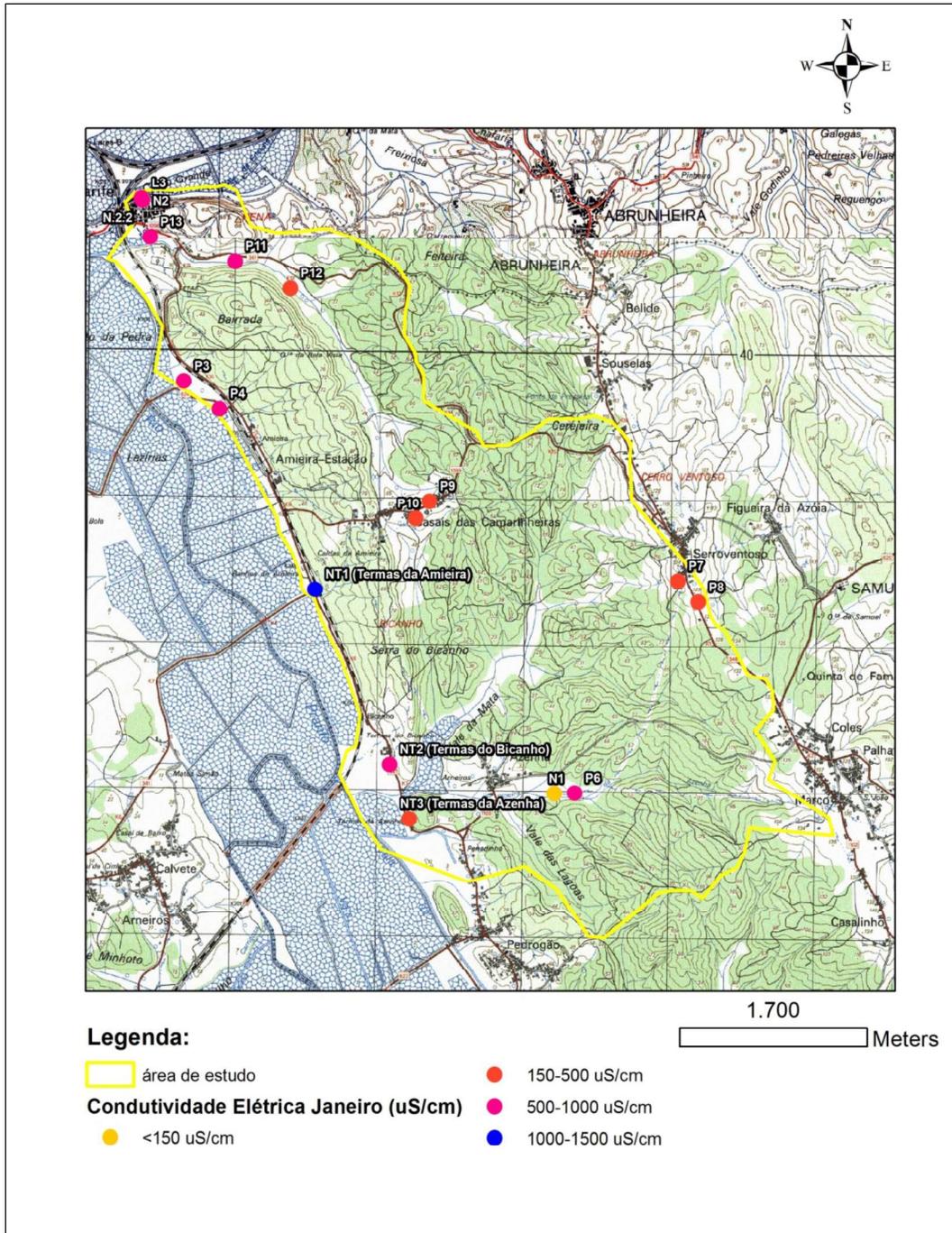


Figura 7.1 - Distribuição da Condutividade elétrica nos pontos de água medidos em Janeiro.

7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

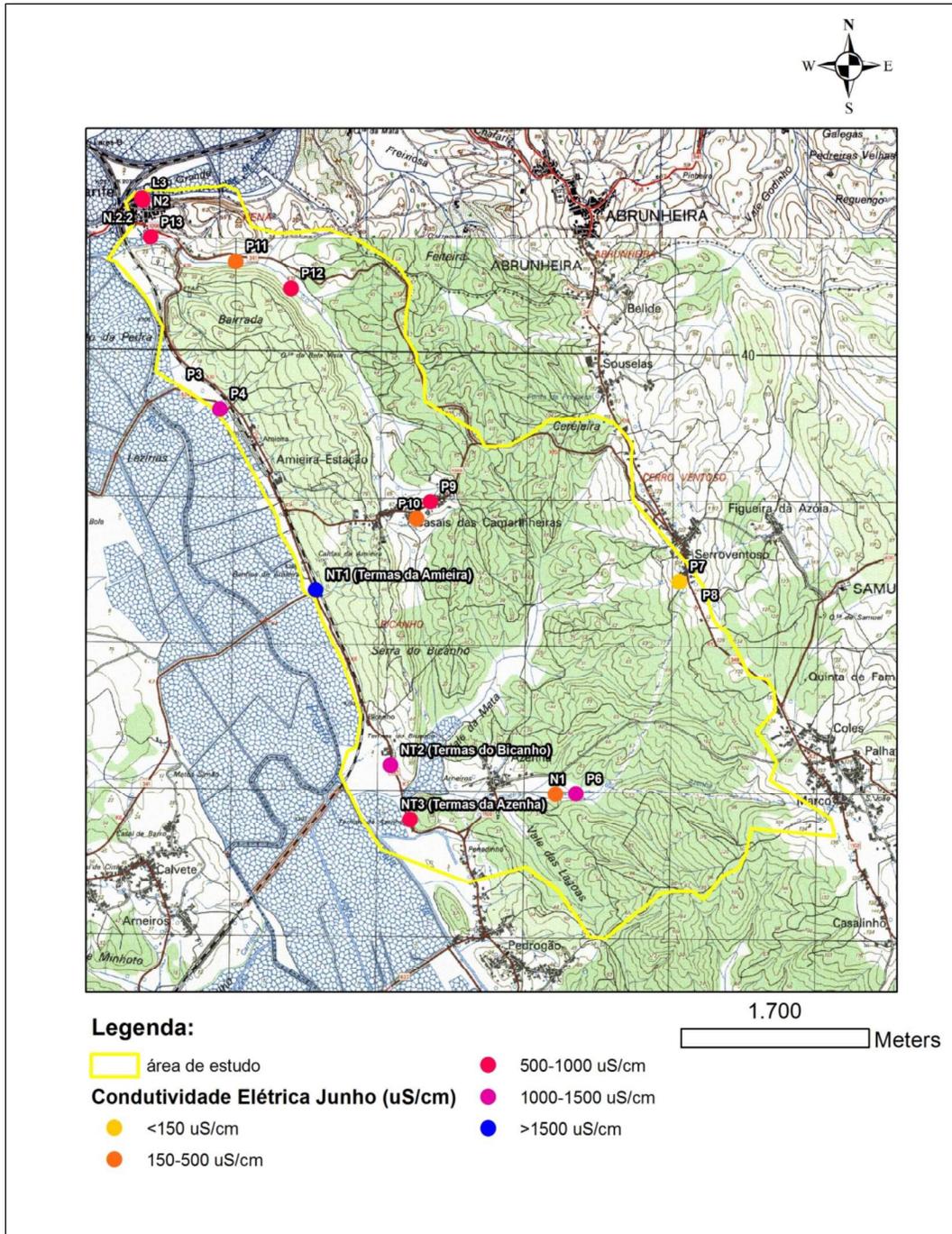


Figura 7.2 - Distribuição da Condutividade elétrica nos pontos de água medidos em Junho.

Os resultados de campo, bem como o tratamento estatístico e gráfico dos dados da Condutividade elétrica evidenciam:

- No que concerne às nascentes termais, o ponto de água NT3 – Banhos da Azenha - apresenta os valores mínimos registado para a C.E., 481  $\mu$ S/cm e 950  $\mu$ S/cm em Janeiro e Junho respetivamente; o ponto de água NT1 – Termas da Azenha – apresenta os valores má-

ximos nas duas campanhas de campo – 1227  $\mu\text{S/cm}$  e 1521  $\mu\text{S/cm}$  em Janeiro e Junho respetivamente; este facto pode ser explicado (1) pela ocorrência de aquíferos profundos; (2) de tempos de residência da água no aquífero elevados e (3) da ascensão rápida da água através de um sistema de fracturação presente.

- Para os restantes pontos de água, os registos de N1 apresentam os valores mínimos nas campanhas de Janeiro e Junho, de 117  $\mu\text{S/cm}$  e 154  $\mu\text{S/cm}$  respetivamente; isto resultará do facto de estas águas terem um tempo de residência baixo, não possibilitando a concentração de sais dissolvidos.

- Ainda no conjunto dos pontos de água não-termais, o valor máximo em Janeiro é de 920  $\mu\text{S/cm}$  no ponto P3 e no ponto P4 em Junho; isto poderá resultar de mistura com águas termais, uma vez que estão pontos estão próximos e alinhados com a grande falha que atravessa as três nascentes termais.

- Com exceção de P7, a evolução dos restantes pontos de água regista um aumento em Junho face a Janeiro, que será devido à diminuição dos caudais nas unidades aquíferas, aumentando a concentração de sais nas águas;

- A nascente N1 apresenta o valor mais baixo de todos os pontos de água amostrados em ambas as campanhas, seguido de P10 em Janeiro e de P7 em Junho. A linha de água L3 apresenta valores mais elevados, em ambas as campanhas, que os pontos referidos anteriormente. Os restantes pontos de água apresentam valores consideravelmente mais elevados em ambas as campanhas.

## 7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

### 7.1.3 – pH

Na tabela seguinte (Tabela 7.5) apresentam-se os valores recolhidos para cada ponto de água.

**Tabela 7.5** – Resultados das medições *in situ* do pH da água; (- não determinado).

Ponto de água	pH	
	Janeiro	Junho
NT1	6,75	7,40
NT2	6,80	7,40
NT3	7,73	8,33
N1	6,10	5,60
N2	7,26	7,30
N2.2	6,95	7,10
L3	7,41	7,43
P3	6,75	-
P4	6,94	7,60
P6	6,60	6,85
P7	7,20	7,00
P8	7,03	-
P9	6,70	7,00
P10	6,98	7,20
P11	7,18	7,35
P12	6,90	7,60
P13	7,20	8,16

A Tabela 7.6 sintetiza os resultados do tratamento estatístico dos registos do pH, apresentados na tabela anterior.

**Tabela 7.6** - Tratamento estatístico dos valores de pH medidos nas campanhas de campo.

Parâmetros estatísticos	pH	
	Janeiro	Junho
Mínimo (nascentes termais)	6,75	7,40
Máximo (nascentes termais)	7,73	8,33
Mínimo (pontos de água fria)	6,10	5,60
Máximo (pontos de água fria)	7,26	8,16
Média (nascentes termais)	7,10	7,70
Média (pontos de águas frias)	6,90	7,20
Mediana (nascentes termais)	6,80	7,40
Mediana (pontos de água fria)	7,00	7,30
Desvio padrão (nascentes termais)	0,60	0,50
Desvio padrão (pontos águas frias)	0,30	0,60
Coeficiente de Variação (nascentes termais)	0,08	0,07
Coeficiente de Variação (pontos de águas frias)	0,05	0,08

Os resultados de campo, bem como o tratamento estatístico dos dados do pH, expressam:

- O pH registado nas amostras das nascentes termais toma como mínimos em Janeiro e Junho o valor de 6,75 e de 7,40 respetivamente, para o ponto NT1. Os máximos são obtidos em NT3, de 7,73 e 8,33 em Janeiro e Junho respetivamente.
- Nos restantes pontos de água, os valores mínimos são obtidos no ponto N1 em Janeiro e Junho, de 6,10 e 5,60 respetivamente. O valor máximo em Janeiro é de 7,26 no ponto N2 e de 8.16 no ponto P13 em Junho.
- Os valores de pH são semelhantes entre nascentes termais e pontos de água fria, não permitindo aferir uma tendência.
- Com exceção de N1 e P7 a evolução dos restantes pontos de água regista um aumento em Junho face a Janeiro, o qual está relacionado com os aumentos registados dos valores de Temperatura e da Condutividade elétrica.
- Os valores de pH são semelhantes para todos os pontos de água amostrados, embora se tenha registado maior amplitude dos valores quantificados em Junho; a nascente “fria” N1 regista o valor mais baixo em ambas as campanhas, enquanto que a nascente hidrotermal NT3 regista os valores mais elevados.

## 7.2 – Parâmetros radiológicos

### 7.2.1 – Radão

Na Tabela seguinte (Tabela 7.7) apresentam-se os valores recolhidos para cada ponto de água.

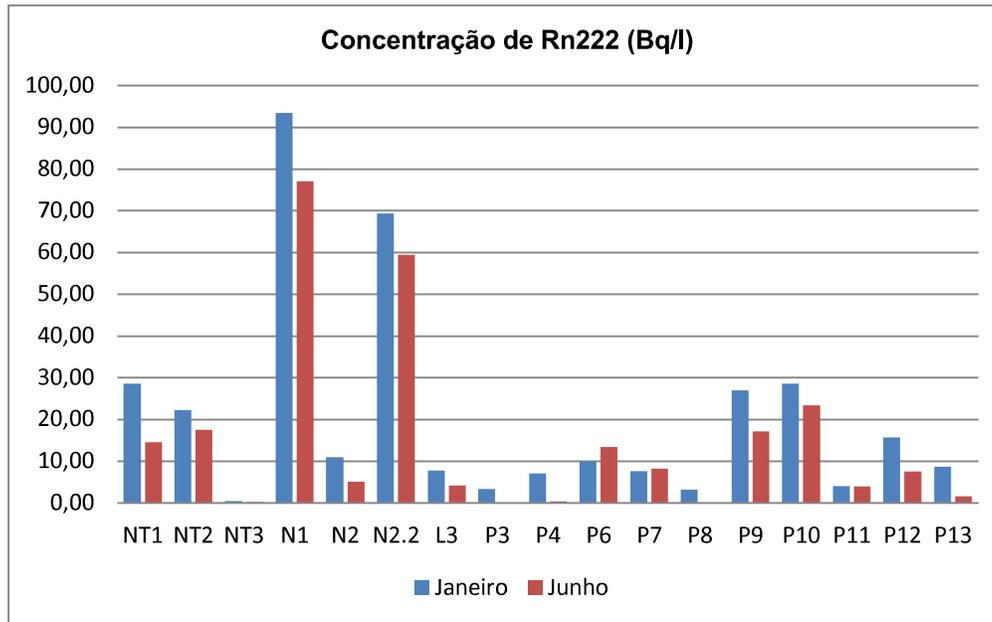
**Tabela 7.7** - Concentração de radão de cada ponto amostrado em Janeiro e em Junho (Bq/l; - não determinado).

Ponto de água	Concentração de $^{222}\text{Rn}$ (Bq/l)	
	Janeiro	Junho
NT1	28,60	14,60
NT2	22,40	17,60
NT3	0,40	0,20
N1	93,40	77,00
N2	11,00	5,10
N2.2	69,30	59,40
L3	7,90	4,20
P3	3,40	-
P4	7,10	0,40
P6	10,00	13,30
P7	7,60	8,30
P8	3,20	-
P9	27,00	17,10
P10	28,60	23,50
P11	4,10	4,00
P12	15,70	7,60
P13	8,70	1,70

Para as nascentes termais os valores mínimos da concentração de radão, obtido em Janeiro e Junho, são de 0,4Bq/l e 0,2Bq/l respetivamente, registadas ambas no ponto NT3 (Termas da Azenha). Os valores máximos obtidos em Janeiro são de 28,6Bq/l para o ponto NT1 e 17,6Bq/l em Junho para o ponto NT2 (Termas do Bicanho).

Para os restantes pontos, o valor mínimo obtido em Janeiro é 3,2Bq/l e 0,4 Bq/l em Junho. Já os valores máximos de concentração em Janeiro e Junho são de 93,4Bq/l e 77,0 Bq/l respetivamente, ambos obtidos no ponto N1. A figura 7.3 apresenta as concentrações de radão-222 para cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.

Figura 7.3 - Concentração de radão em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo (Bq/l).



A Tabela 7.8 sintetiza os resultados do tratamento estatístico dos registos da concentração de radão, apresentados na tabela anterior.

**Tabela 7.8** – Tratamento estatístico da concentração de radão nas duas campanhas de campo (em Bq/l).

Parâmetros estatísticos	Concentração de Rn222 (Bq/l)	
	Janeiro	Junho
Mínimo (nascentes termais)	0,40	0,20
Máximo (nascentes termais)	28,60	17,60
Mínimo (pontos de água fria)	3,20	0,40
Máximo (pontos de água fria)	93,40	77,00
Média (nascentes termais)	17,10	10,80
Média (pontos de águas frias)	21,20	18,50
Mediana (nascentes termais)	22,40	14,60
Mediana (pontos de água fria)	9,30	7,90
Desvio padrão (nascentes termais)	14,80	9,30
Desvio padrão (pontos águas frias)	27,10	24,50
Coeficiente de variação (nascentes termais)	0,90	0,90
Coeficiente de variação (pontos de águas frias)	1,30	1,30

A redução das concentrações de radão, tanto em nascentes termais como em pontos de águas frias, pode-se dever a diminuição de caudais, uma vez que quanto menos caudal mais o radão terá tendência para escapar. No entanto em dois pontos de água (P6 e P7) houve um aumento da concentração de radão. Outra causa para esta diminuição da concentração de radão nas águas amostradas em Junho pode-se a mistura com outras águas da região mais superficiais.

Os valores médios de concentração para os pontos de águas frias determinados em Janeiro e Junho, de 21,2Bq/l e 18,5Bq/l respetivamente, são mais elevados que os valores médios de concentração determinados por Morgado (2011) na região de Condeixa-a-Nova, que é de 13 Bq/l.

As figuras seguintes (Figuras 7.4 e 7.5) apresentam a distribuição dos valores registados de radão nos pontos de água medidos para as duas campanhas de campo.

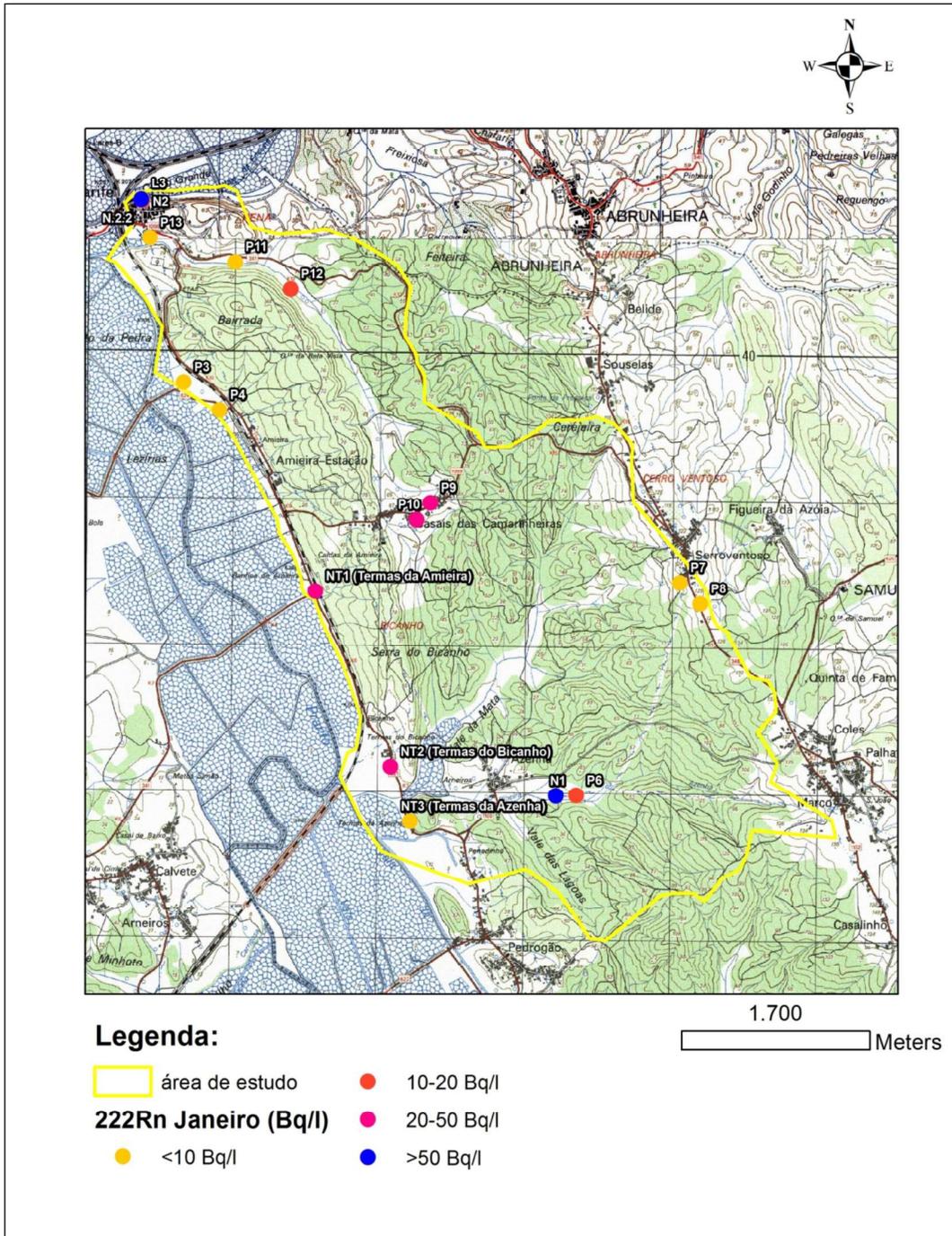


Figura 7.4 - Distribuição de radão-222 nos pontos de água medidos em Janeiro.

## 7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

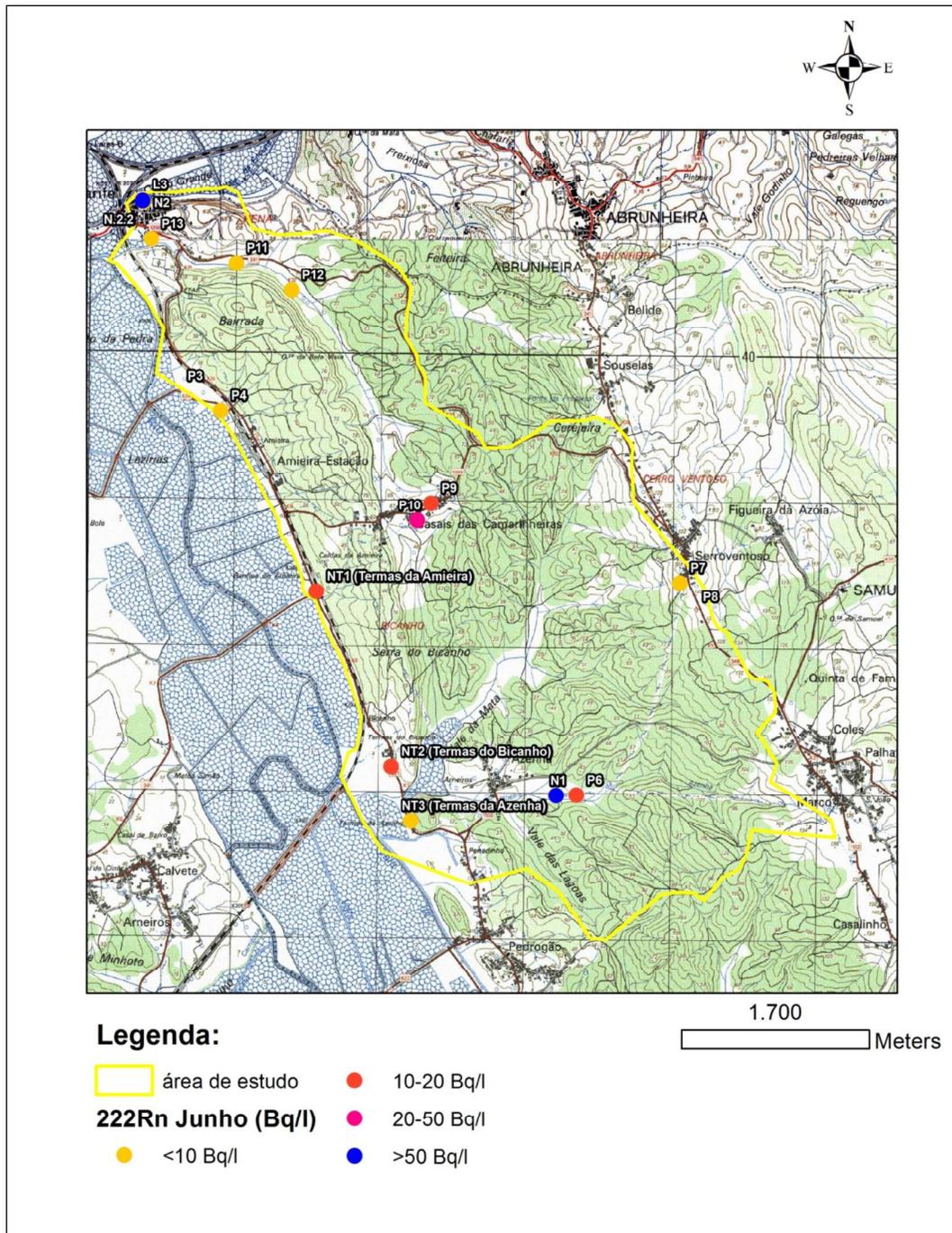


Figura 7.5 - Distribuição de radão-222 nos pontos de água medidos em Junho.

### 7.2.2 – Rádio

Na Tabela seguinte (Tabela 7.9) apresentam-se os valores recolhidos para cada ponto de água.

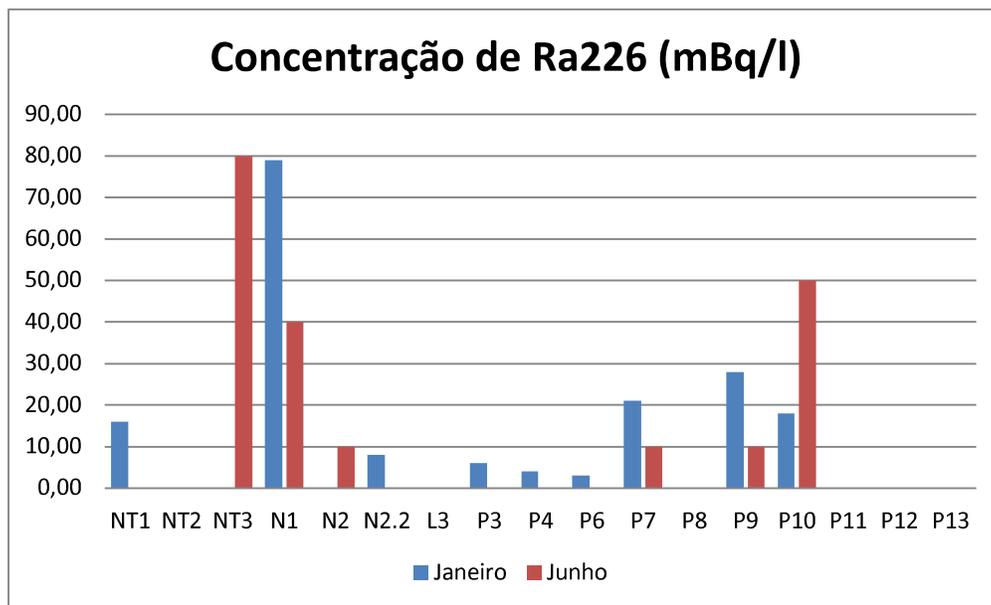
**Tabela 7.9** - Concentração de rádio-226 de cada ponto amostrado em Janeiro e em Junho (mBq/l; <ld abaixo do limite de deteção; - não determinado).

Ponto de água	Concentração de <sup>226</sup> Ra (mBq/l)	
	Janeiro	Junho
NT1	16,00	<ld
NT2	<ld	<ld
NT3	<ld	80,00
N1	79,00	40,00
N2	<ld	10,00
N2.2	8,00	<ld
L3	<ld	<ld
P3	6,00	-
P4	4,00	<ld
P6	3,00	<ld
P7	21,00	10,00
P8	<ld	-
P9	28,00	10,00
P10	18,00	50,00
P11	<ld	<ld
P12	<ld	<ld
P13	<ld	<ld

Neste parâmetro radiológico o valor mínimo da concentração de rádio-226 obtido em Janeiro para as nascentes termais ficou abaixo do limite de deteção (<ld) e o valor máximo é 16mBq/l. Em Junho o valor mínimo determinado também ficou abaixo do limite de deteção e o valor máximo determinado é de 80mBq/l.

Para os restantes pontos de água o valor mínimo da concentração de rádio em Janeiro ficou abaixo do limite de deteção e o valor máximo é de 79mBq/l. Em Junho o valor mínimo determinado ficou abaixo do limite de deteção e o valor máximo é 80mBq/l. A figura 7.6 apresenta a concentração de rádio-226 para cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.

**Figura 7.6** – Concentração de rádio-226 em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo (mBq/l).



A Tabela 7.10 sintetiza os resultados do tratamento estatístico dos registos da concentração de rádio, apresentados na tabela anterior.

**Tabela 7.10** - Tratamento estatístico da concentração de rádio-226 nas duas campanhas de campo (em mBq/l).

Parâmetros estatísticos	Concentração de Ra226 (mBq/l)	
	Janeiro	Junho
Mínimo (nascentes termais)	<ld	<ld
Máximo (nascentes termais)	16,00	80,00
Mínimo (pontos de água fria)	<ld	<ld
Máximo (pontos de água fria)	79,00	80,00
Média (nascentes termais)	16,00	80,00
Média (pontos de águas frias)	20,90	24,00
Mediana (nascentes termais)	16,00	80,00
Mediana (pontos de água fria)	13,00	10,00
Desvio padrão (nascentes termais)	<ld	<ld
Desvio padrão (pontos águas frias)	25,20	19,50
Coeficiente de variação (nascentes termais)	0,60	0,70
Coeficiente de variação (pontos de águas frias)	1,20	0,80

Os valores das concentrações de rádio-226 esperados deveriam aumentar na campanha de Junho, uma vez que a diminuição dos caudais aumentaria as concentrações de rádio, tanto nas nascentes termais como nos restantes pontos de água. O que se constata é que embora tenha havido um aumento da concentração na nascente termal NT3 (Termas da Azenha), as outras duas nascentes termais (NT1 e NT2) viram os seus valores de concentração de rádio diminuir.

Esta diminuição pode dever-se a efeitos de retardamento na descarga aquífera, obtendo-se valores mais elevados de caudal na altura da amostragem em comparação com a amostragem realizada em Janeiro. Outra possibilidade é o efeito de diluição do rádio devido à mistura das águas termais com outras águas frias da região.

Os valores médios registados da concentração de rádio-226 são inferiores ao valor determinado por Morgado (2011), com concentração média registada de 70 mBq/l na região de Condeixa-a-Nova. Apenas as nascentes hidrotermais em estudo (Amiera, Bicanho e Azenha) registam valor médio de concentração superior em Junho, de 80 mBq/l.

As figuras seguintes (Figuras 7.7 e 7.8) apresentam a distribuição das concentrações registadas de rádio-226 nos pontos de água medidos, para as duas campanhas de campo.

7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

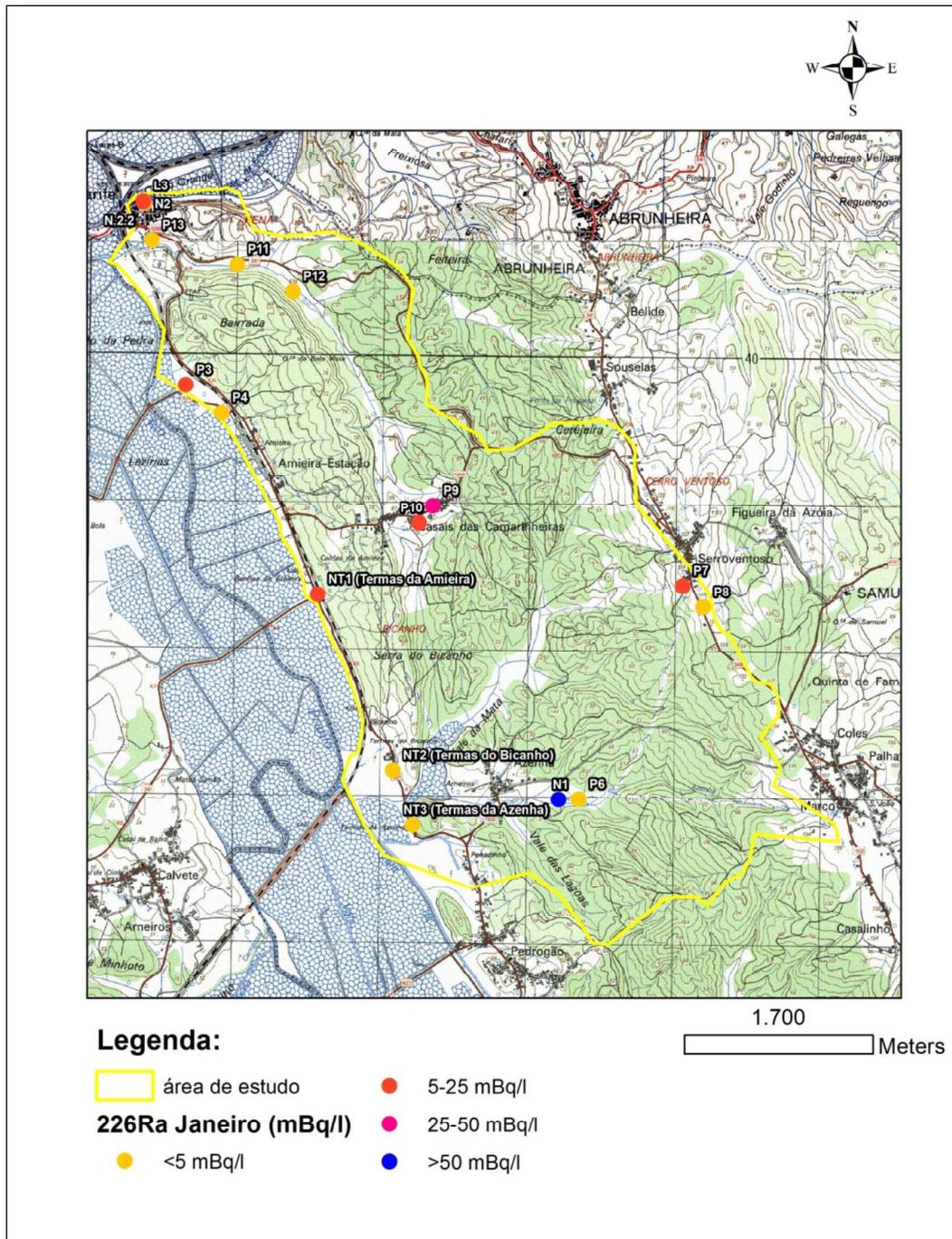


Figura 7.7 - Distribuição do rádio-226 nos pontos de água analisados em Janeiro.

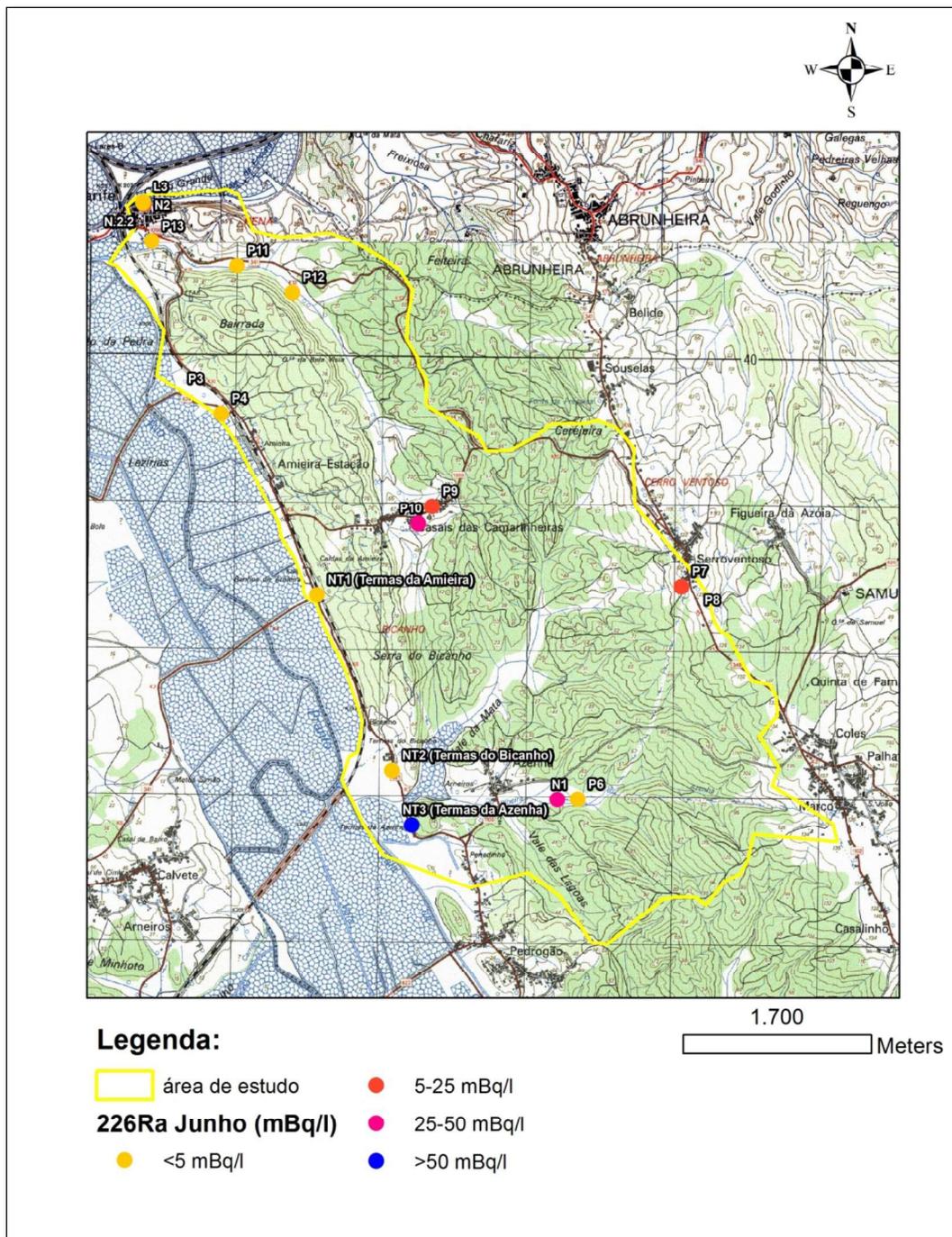


Figura 7.8 - Distribuição do rádio-226 nos pontos de água analisados em Junho.

## 7.2.3 – Urânio

Na Tabela seguinte (Tabela 7.11) apresentam-se os valores recolhidos para cada ponto de água.

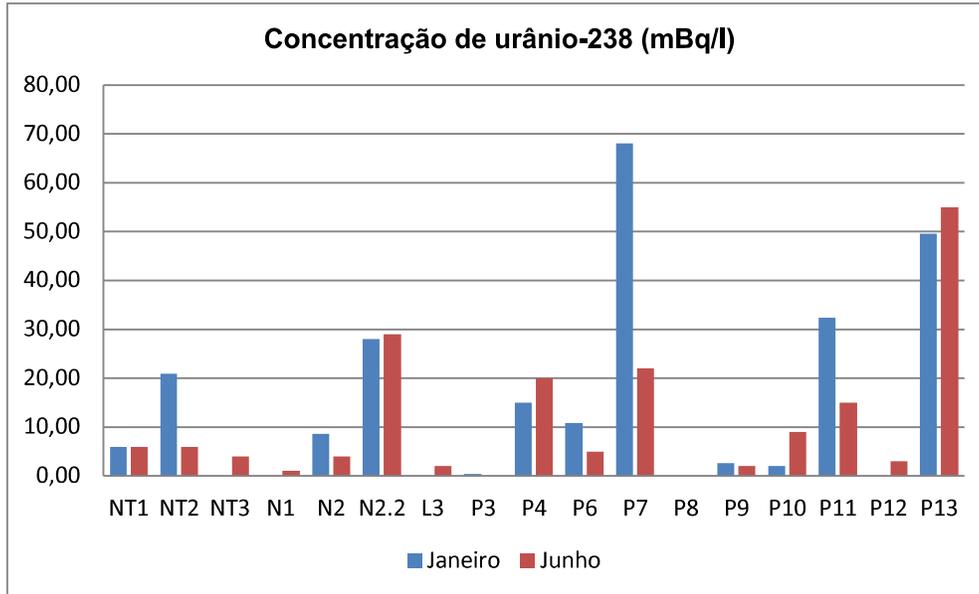
**Tabela 7.11** – Concentrações de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  e U Total de cada ponto de água amostrado em Janeiro e em Junho (<ld abaixo do limite de deteção; - não determinado).

Ponto de água	$^{238}\text{U}$		$^{234}\text{U}$		$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$		U (ppb)	
	Janeiro	Junho	Janeiro	Junho	Janeiro	Junho	Janeiro	Junho
NT1	5,90	6,00	7,90	6,00	1,30	1,00	0,50	0,50
NT2	20,90	6,00	26,10	8,00	1,30	1,30	1,70	0,50
NT3	<ld	4,00	<ld	7,00	<ld	1,80	<ld	0,30
N1	<ld	1,00	<ld	1,00	<ld	1,00	<ld	0,10
N2	8,60	4,00	10,40	2,00	1,20	0,50	0,70	0,30
N2.2	28,00	29,00	41,00	46,00	1,50	1,60	2,30	2,40
L3	<ld	2,00	<ld	3,00	<ld	1,50	<ld	0,20
P3	0,40	-	0,40	-	1,00	-	0,00	-
P4	15,10	20,00	13,10	1,00	0,90	0,10	1,20	1,60
P6	10,80	5,00	7,40	7,00	0,70	1,40	0,90	0,40
P7	68,10	22,00	49,90	34,00	0,70	1,50	5,50	1,80
P8	<ld	-	<ld	-	<ld	-	<ld	-
P9	2,70	2,00	1,50	4,00	0,60	2,00	0,20	0,20
P10	2,10	9,00	1,00	7,00	0,50	0,80	0,20	0,70
P11	32,40	15,00	41,70	9,00	1,30	0,60	2,60	1,20
P12	<ld	3,00	<ld	3,00	<ld	1,00	<ld	0,20
P13	49,50	55,00	29,80	4,00	0,60	0,10	4,00	4,50

Na análise do urânio foram determinadas as concentrações de dois isótopos, sendo  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  e urânio total (em partes por bilião). O valor mínimo da concentração de  $^{238}\text{U}$  em Janeiro para as nascentes termais situa-se abaixo do limite de deteção (<ld) e o valor máximo é 20,9mBq/l. Em Junho, o valor mínimo de concentração é 4,0mBq/l e o valor máximo é 6,0mBq/l.

Para os restantes pontos de água, o valor mínimo de concentração de  $^{238}\text{U}$  em Janeiro, situa-se abaixo do limite de deteção e o valor máximo é 68,1 mBq/l. Em Junho, o valor mínimo da concentração determinado é 1,0mBq/l e o valor máximo é 55mBq/l. A figura 7.9 apresenta as concentrações de  $^{238}\text{U}$  para cada ponto de água analisado nas duas campanhas.

Figura 7.9 - Concentração de urânio-238 em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.



As figuras 7.10 e 7.11 apresentam a distribuição das concentrações registadas de  $^{238}\text{U}$  nas duas campanhas de campo.

7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

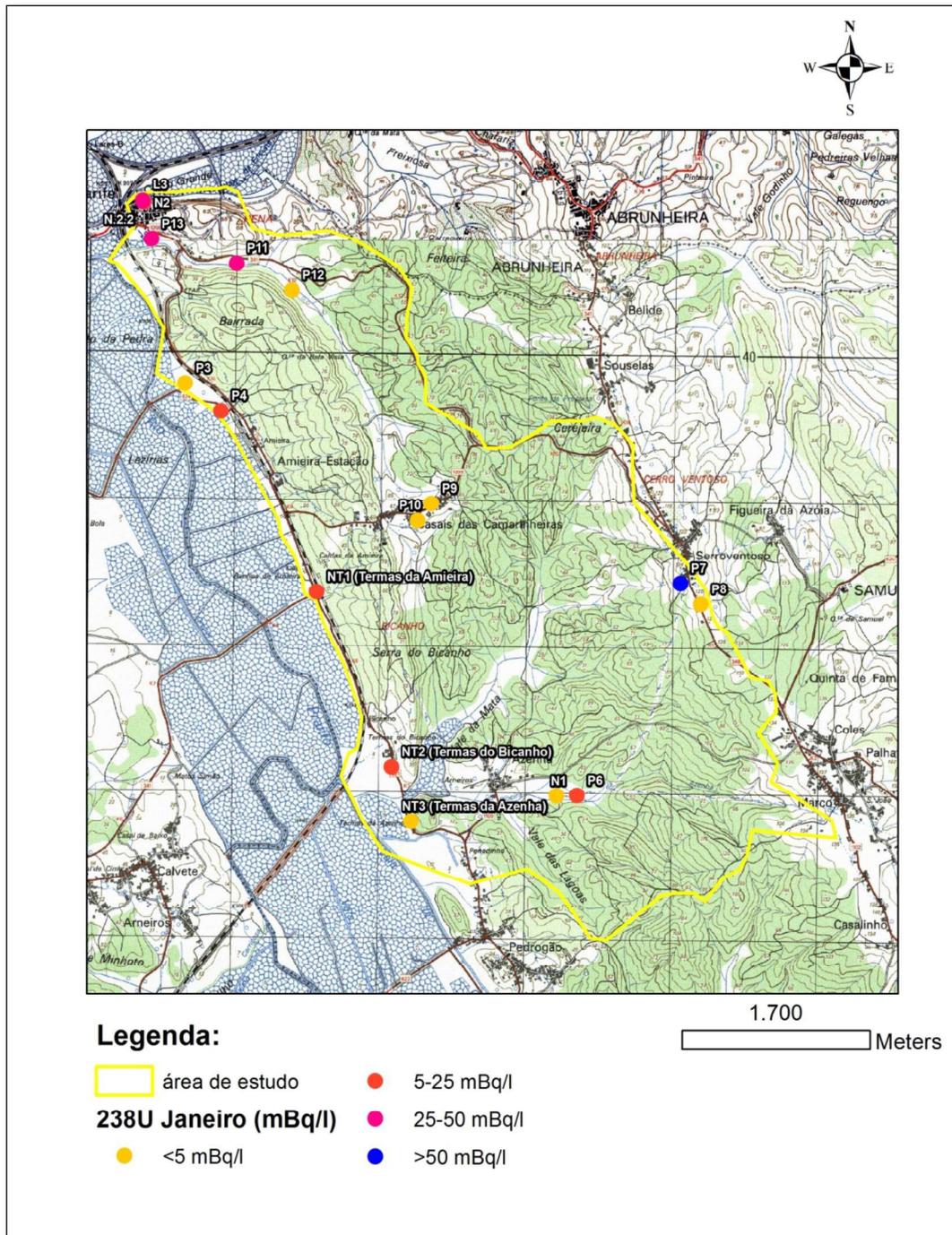


Figura 7.10 - Distribuição das concentrações de urânio-238 nos pontos de água em Janeiro.

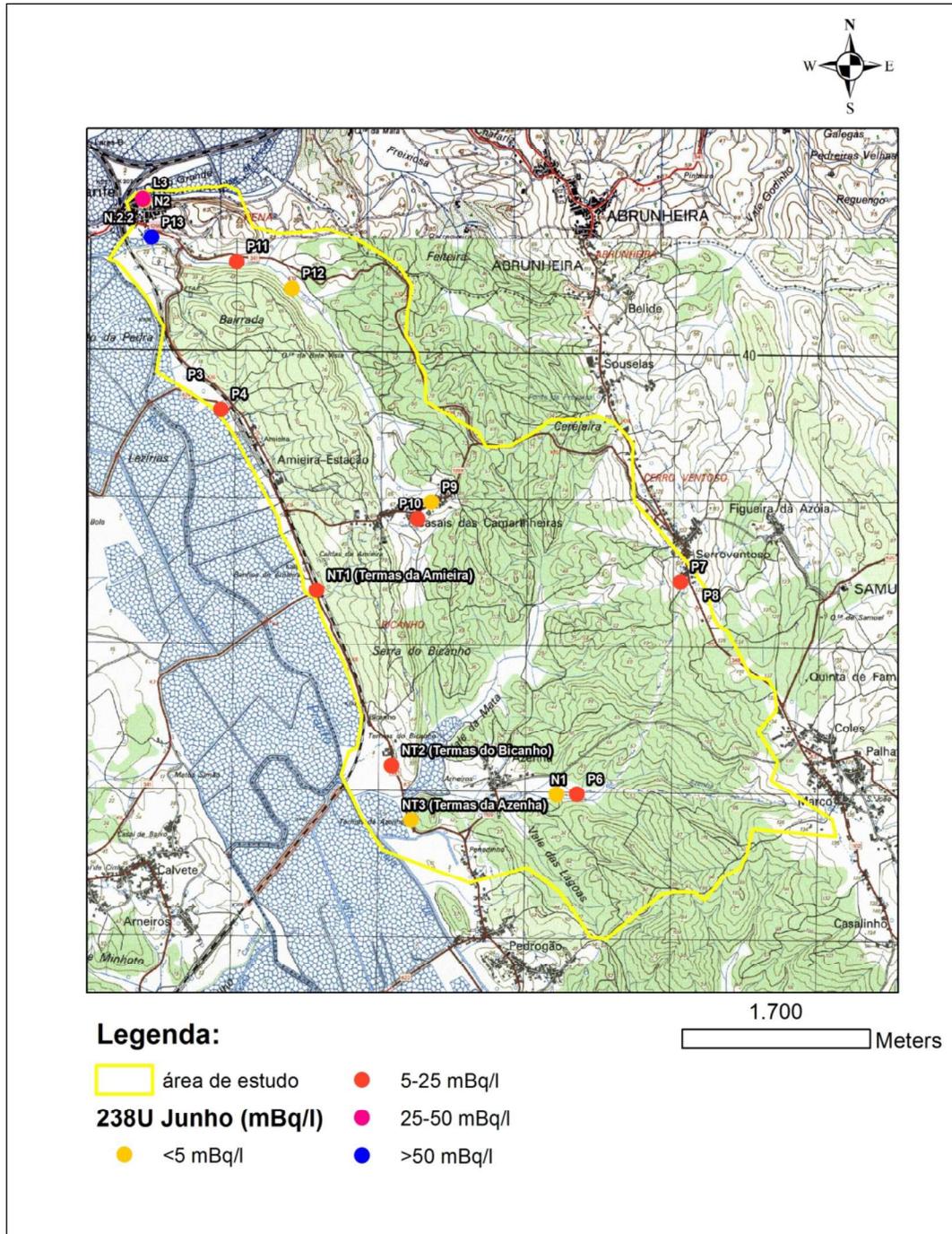


Figura 7.11 – Distribuição do urânio-238 nos pontos de água analisados em Junho.

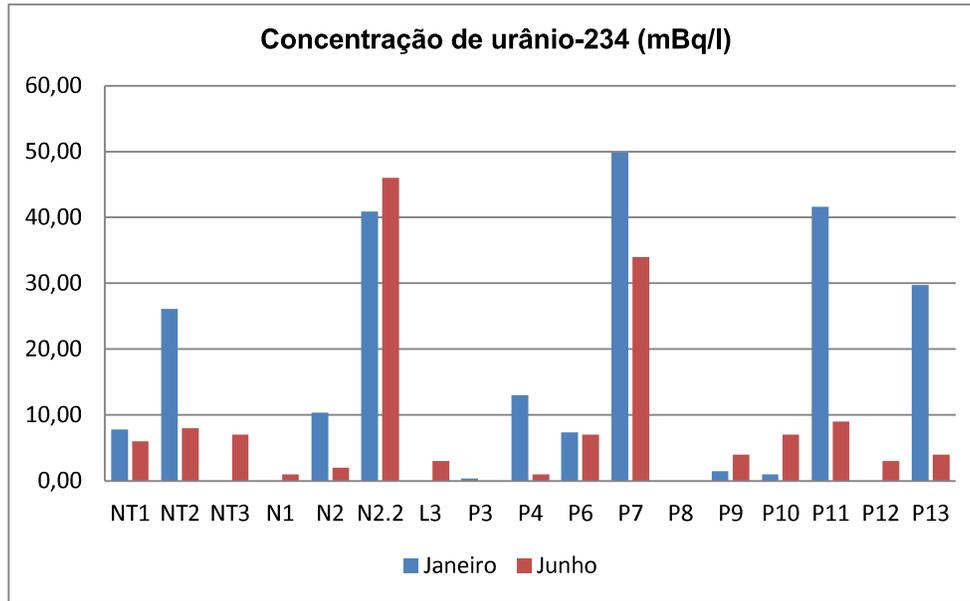
Em relação ao  $^{234}\text{U}$ , o valor mínimo de concentração em Janeiro, para as nascentes termais situa-se abaixo do limite de deteção e o valor máximo determinado é 26,1 mBq/l. Em Junho, os valores de concentração mínimo e máximo são 6,0mBq/l e 8,0mBq/l respetivamente.

Para os restantes pontos de água, os valores mínimo e máximo de concentração determinados em Janeiro são abaixo do limite de deteção e 49,9 mBq/l respetivamente. Em Junho,

## 7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

os valores mínimo e máximo são respetivamente, 1,0mBq/l e 46mBq/l. A figura 7.12 apresenta as concentrações de  $^{234}\text{U}$  registadas em cada ponto de água analisado, nas duas campanhas de campo.

**Figura 7.12** - Concentração de urânio-234 em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.



As figuras 7.13 e 7.14 apresentam a distribuição das concentrações registadas de  $^{234}\text{U}$  nas duas campanhas de campo.

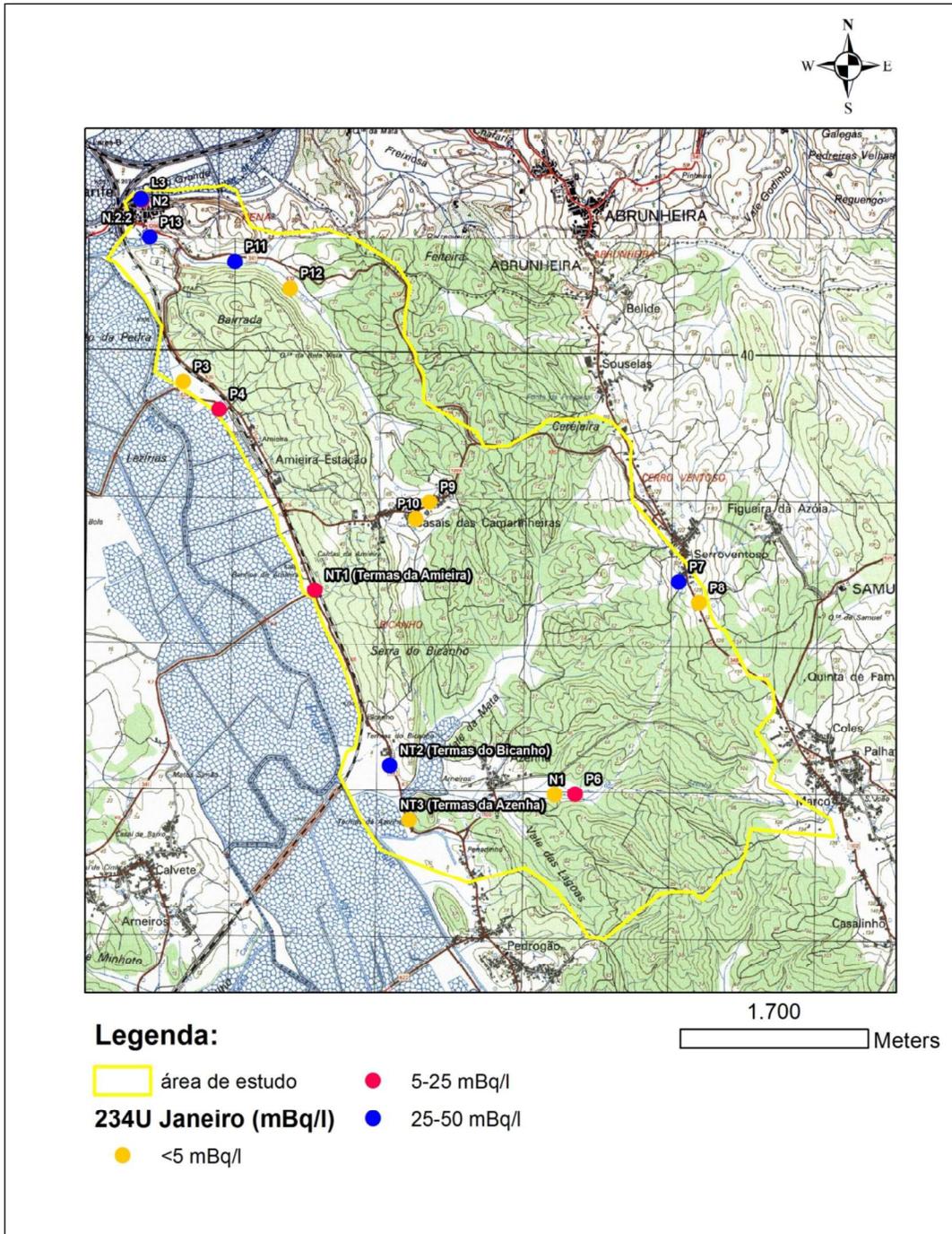


Figura 7.13 - Distribuição do urânio-234 nos pontos de água analisados em Janeiro.

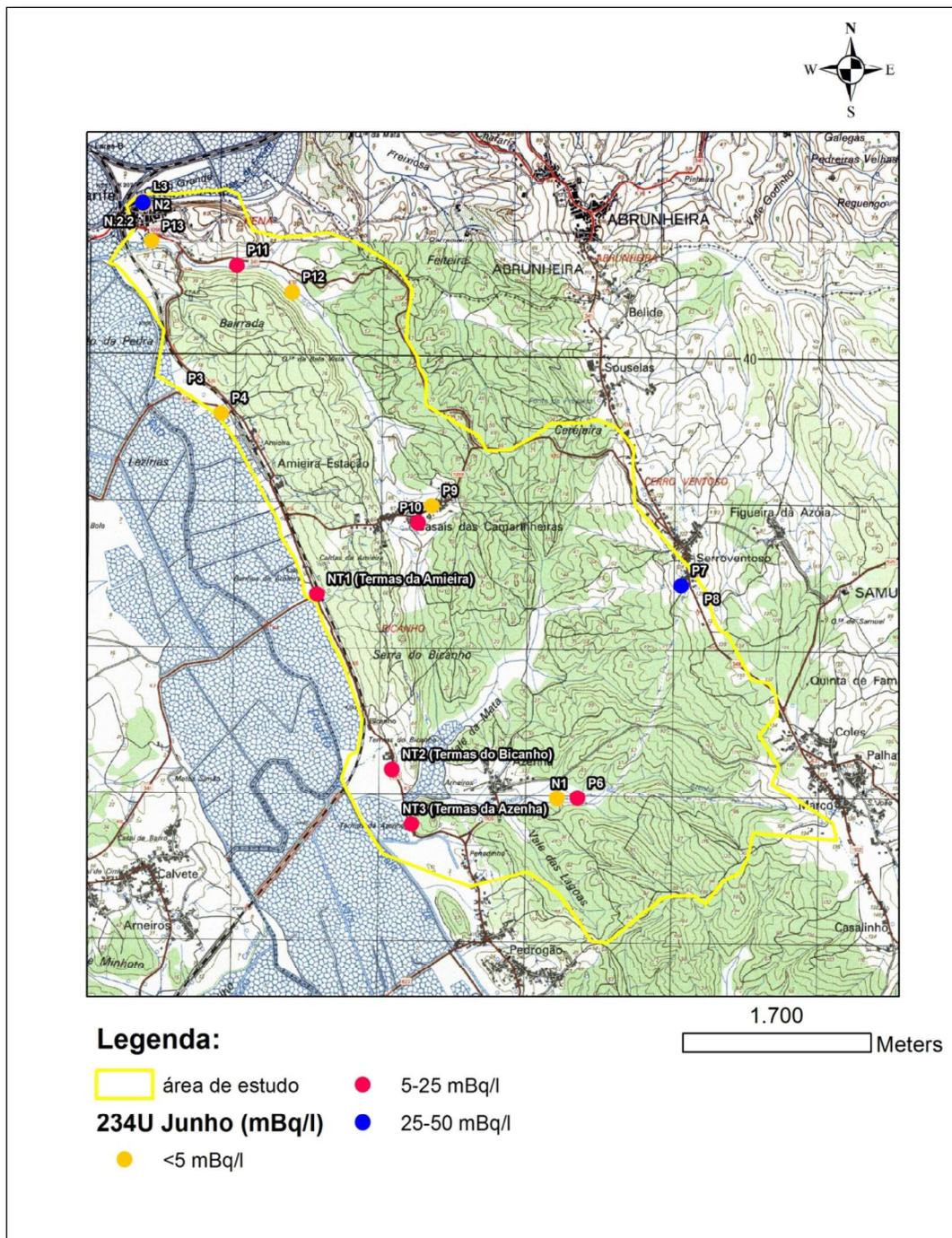
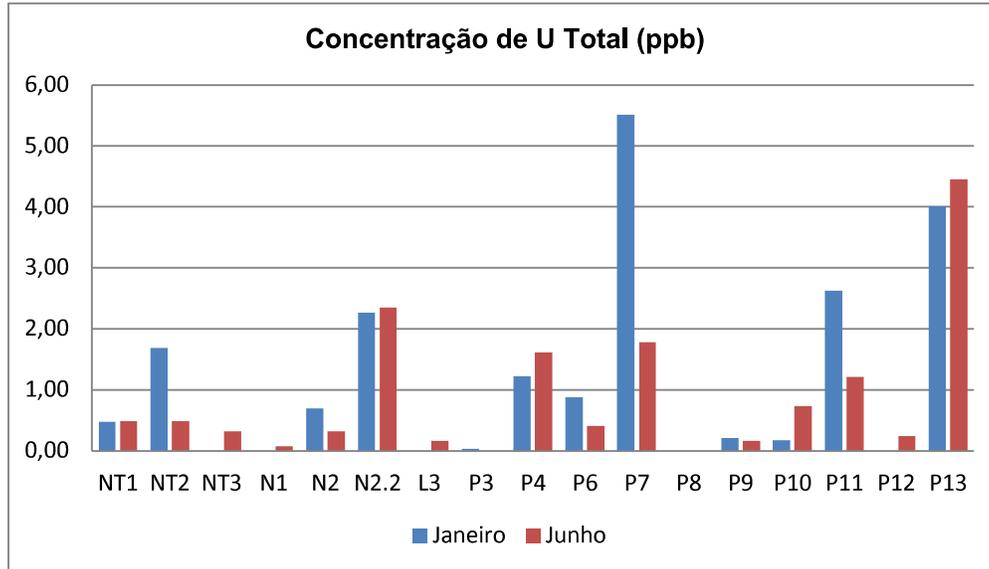


Figura 7.14 - Distribuição do urânio-234 nos pontos de água analisados em Junho.

No que concerne às contrações de urânio total, o valor mínimo obtido em Janeiro varia de abaixo do limite de deteção e máximo de 5,5 ppb. Em Junho, os valores mínimo e máximo são respetivamente, 0,2ppb e 4,5ppb. A figura 7.15 apresenta as concentrações de U Total em cada ponto de água analisado, nas duas campanhas de campo.

**Figura 7.15** - Concentração de urânio total em cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.



As figuras 7.16 e 7.17 apresentam a distribuição das concentrações registadas de U Total nas duas campanhas de campo.

7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

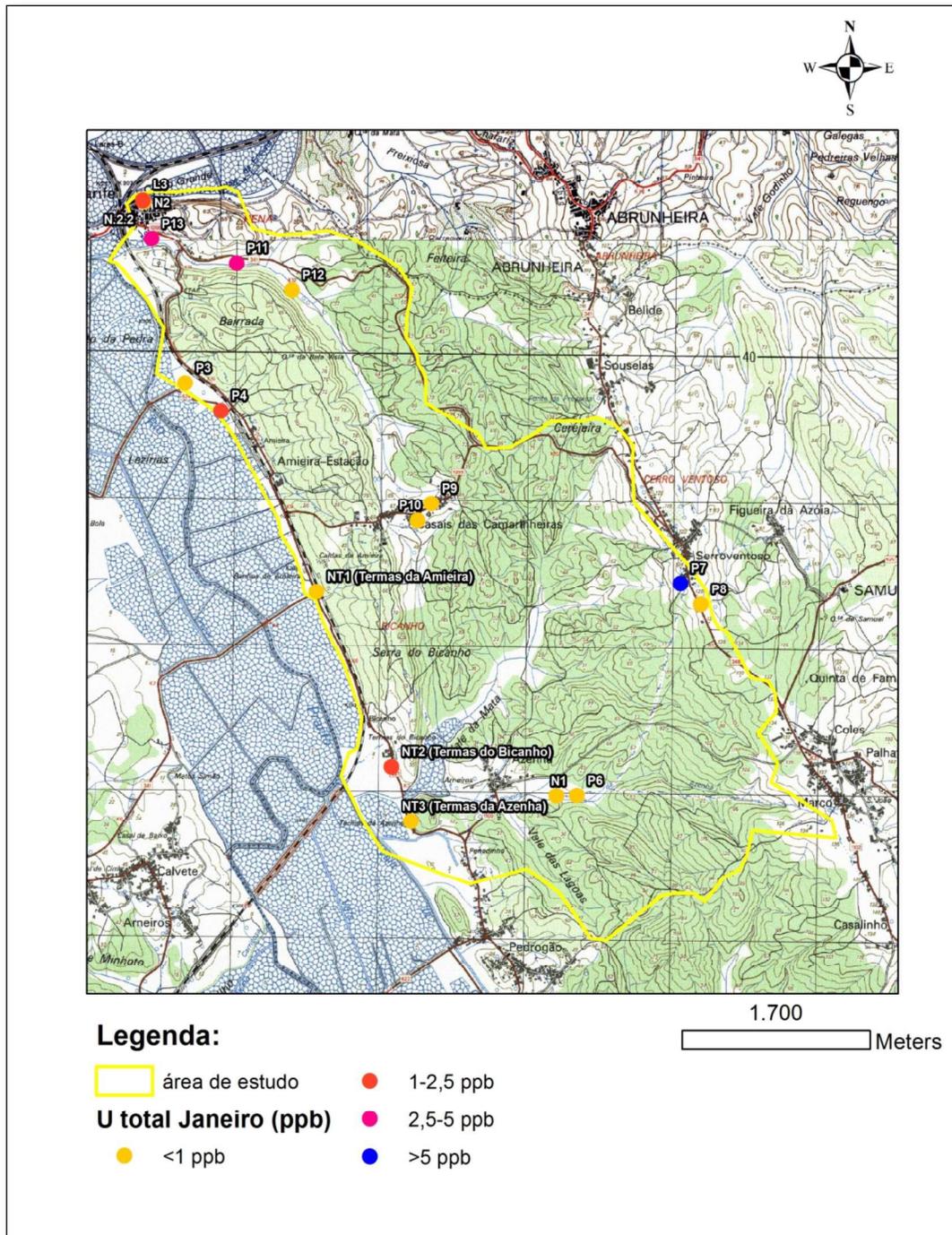


Figura 7.16 - Distribuição do urânio total nos pontos de água analisados em Janeiro.

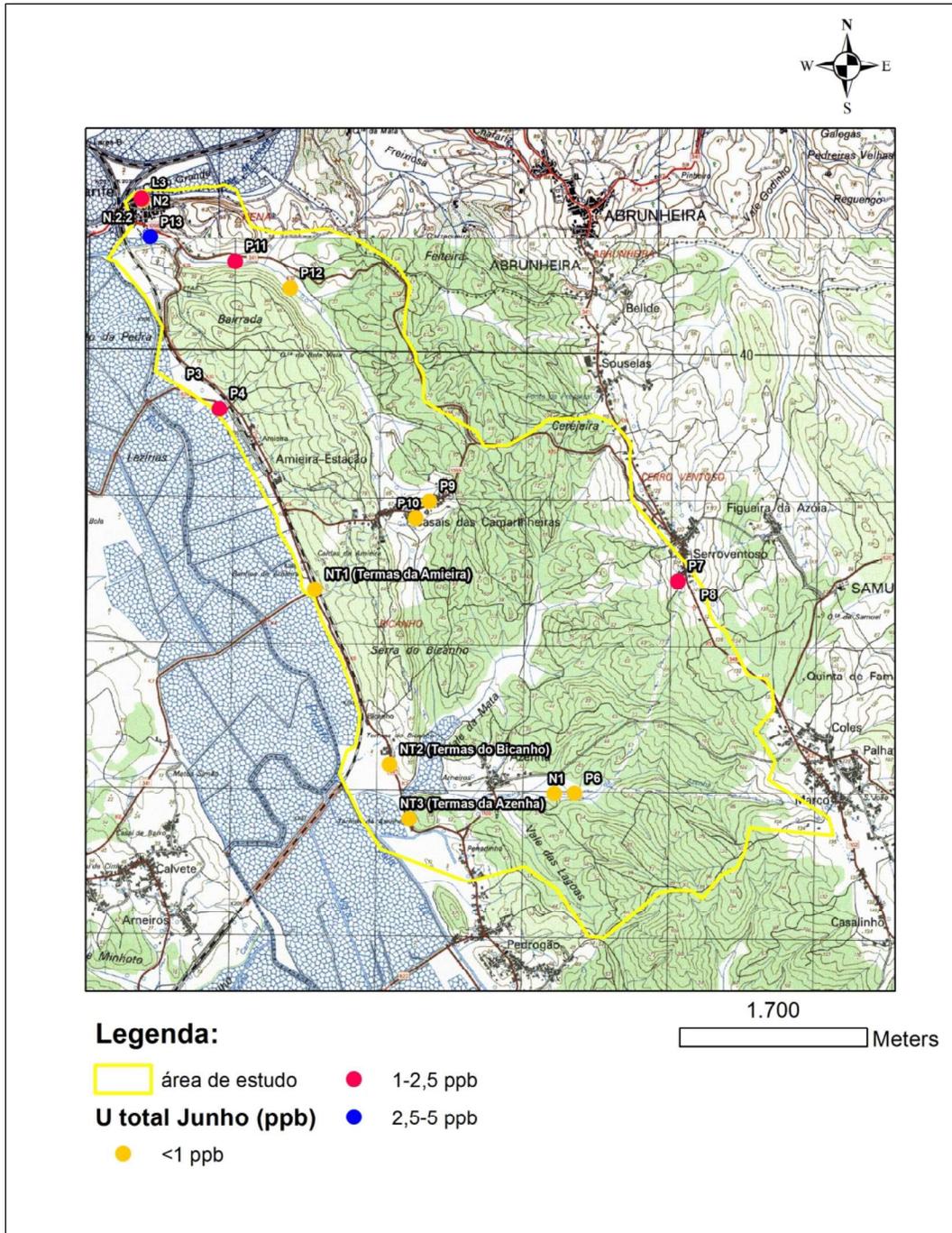


Figura 7.17 - Distribuição do urânio total nos pontos de água analisados em Junho.

A Tabela 7.12 sintetiza os resultados do tratamento estatístico dos registos das concentrações de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  e U total, apresentados na tabela anterior.

**Tabela 7.12** - Tratamento estatístico da concentração dos isótopos  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  nas campanhas de campo de Janeiro e Junho (<ld abaixo do limite de detecção).

Parâmetros estatísticos	238U (mBq/l)		234U (mBq/l)		U (ppb)	
	Janeiro	Junho	Janeiro	Junho	Janeiro	Junho
Mínimo (nascentes termais)	<ld	4,00	<ld	6,00	<ld	0,30
Máximo (nascentes termais)	20,90	6,00	26,10	8,00	1,70	0,50
Mínimo (pontos de água fria)	<ld	1,00	<ld	1,00	<ld	0,10
Máximo (pontos de água fria)	68,10	55,00	49,90	46,00	5,50	4,50
Média (nascentes termais)	13,40	5,30	17,00	7,00	1,10	0,40
Média (pontos de águas frias)	21,80	13,90	19,60	10,10	1,80	1,10
Mediana (nascentes termais)	13,40	13,40	17,00	7,00	1,10	0,50
Mediana (pontos de água fria)	13,00	7,00	11,70	4,00	1,00	0,60
Desvio padrão (nascentes termais)	10,60	1,20	12,90	1,00	0,90	0,10
Desvio padrão (pontos águas frias)	22,60	15,90	19,10	14,40	1,80	1,30
Coefficiente de variação (nascentes termais)	0,80	0,20	0,80	0,10	0,80	0,20
Coefficiente de variação (pontos de águas frias)	1,00	1,10	1,00	1,40	1,00	1,10

Constata-se que houve um aumento da concentração de  $^{238}\text{U}$  na amostragem realizada em Junho na maioria dos pontos de água, embora tenha havido uma grande diminuição na nascente termal NT2 (Termas do Bicanho) e nos pontos de água fria P7 e P11. Os restantes pontos viram as suas concentrações aumentar, embora de forma pouco significativa.

As concentrações de  $^{234}\text{U}$  em Junho diminuíram na maioria dos pontos de água em estudo, com exceção dos pontos NT3, N1, N2.2, L3, P9, P10 e P12, que viram as suas concentrações aumentar face a Janeiro. À exceção do ponto P9, todos os pontos em que se obteve aumento das concentrações de  $^{234}\text{U}$  em Junho, aumentaram também os valores da concentração de  $^{238}\text{U}$  nesse mesmo mês. Face aos aumentos registados das concentrações de  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$ , obtiveram-se, evidentemente, aumentos da concentração de urânio total.

Os valores médios das concentrações registadas de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  e U total são mais baixos que os valores de concentração determinados por Morgado (2011), na região de Condeixa-a-Nova, de 1 Bq/l para o  $^{238}\text{U}$ , 0,6Bq/l para  $^{234}\text{U}$  e 82ppb pra U Total. Os valores de concentra-

ção de U Total registados também são inferiores aos registados por Correia Marques *et al.* (1979), nas regiões de Pombal (0,8 a 3,4 ppm), Vinha da Rainha (62 ppb), Condeixa-a-Nova (0,8 a 3,5ppm) e Tentúgal (2,2 a 5,4 ppm).

#### 7.2.4 – Dose efetiva

No cálculo da dose efetiva foram considerados os valores das concentrações de  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$  das campanhas de campo realizadas em Janeiro e em Junho. Em Janeiro o valor máximo calculado é de 0,0161 mSv/ano e, de 0,0167 mSv/ano em Junho. Estes valores estão abaixo do valor limite estipulado pelo Decreto-Lei 306/2007 e pela norma da Comunidade Europeia 2013/51/EURATOM, não representando as águas analisadas, do ponto de vista radiológico, perigo para a saúde pública.

A Tabela seguinte (Tabela 7.13) sintetiza os valores para a dose efetiva em todos os pontos de água amostrados em ambas as campanhas de campo.

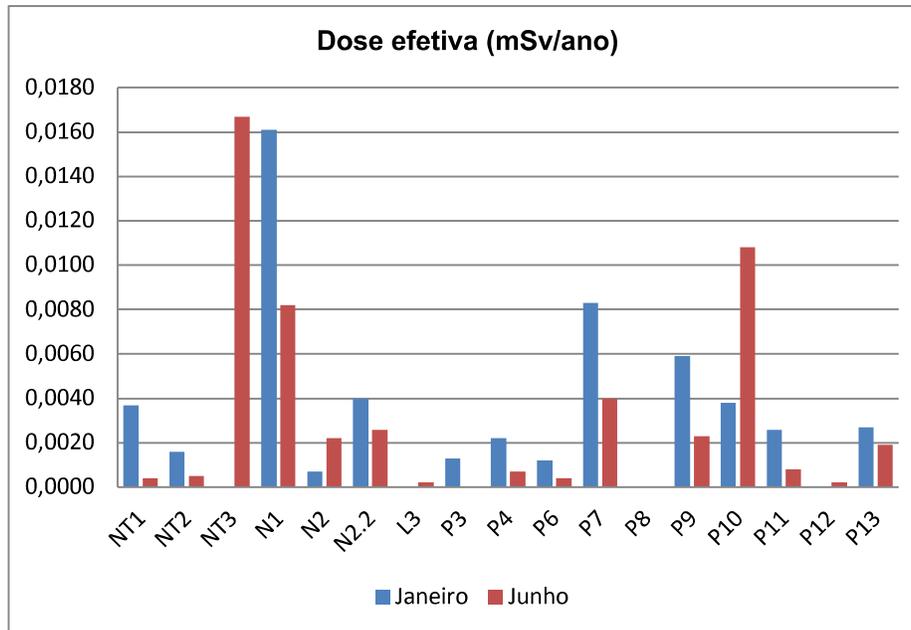
**Tabela 7.13** - Valores do cálculo da dose efetiva de cada ponto amostrado em Janeiro e em Junho (mSv/ano; - não determinado).

Pontos de água	Dose efetiva (mSv/ano)	
	Janeiro	Junho
NT1	0,0037	0,0004
NT2	0,0016	0,0005
NT3	0,0000	0,0167
N1	0,0161	0,0082
N2	0,0007	0,0022
N2.2	0,0040	0,0026
L3	0,0000	0,0002
P3	0,0013	-
P4	0,0022	0,0007
P6	0,0012	0,0004
P7	0,0083	0,0040
P8	0,0000	-
P9	0,0059	0,0023
P10	0,0038	0,0108
P11	0,0026	0,0008
P12	0,0000	0,0002
P13	0,0027	0,0019

## 7 – Caracterização Físico-química e Radiológica

A figura 7.18 apresenta os valores calculados para a dose efetiva para cada ponto de água analisado nas duas campanhas de campo.

**Figura 7.18** - Valores de dose efetiva para cada ponto de água analisado (mSv/ano).



## 8 – Considerações finais e Recomendações

Na sequência de Formações sedimentares que afloram na área estudada estão implantadas várias unidades aquíferas. Algumas são de natureza freática não-confinada, nomeadamente as implantadas nos depósitos aluvionares do Rio Pranto e linhas de água principais. Outras apresentam regime confinado a semi-confinado; neste grupo destaca-se o aquífero hidrotermal que alimenta as Termas da Amiera, Bicanho e Banhos da Azenha e que se implementará na Formação dos Arenitos do Carrascal ( $C^{1-2}$ ). A ascensão e descarga da água termal estão condicionadas pela presença de uma fratura regional com orientação N25°W e aproximadamente paralela ao Rio Pranto e pela interceção com fraturas locais com orientação preferencial N45°E e N80°E.

O fluxo subterrâneo das unidades aquíferas semi-confinadas a confinadas realiza-se de nordeste para sudoeste em direção ao Rio Pranto. No geral a recarga aquífera efetua-se através da precipitação atmosférica e infiltração, ao longo da superfície aflorante e nos contactos com outras unidades aquíferas.

A caracterização físico-química das águas subterrâneas realizadas *in situ* evidenciou:

- A Temperatura da água aumentou em todos os pontos de água medidos em Junho face a Janeiro; o valor médio da Temperatura das águas das nascentes hidrotermais em Janeiro é de 25,3°C e de 27,2°C em Junho. Para os restantes pontos de água, o valor médio da Temperatura é 13,2°C em Janeiro e de 19,8°C em Junho.

- A Condutividade elétrica aumentou em Junho em todos os pontos de água medidos, com uma exceção (P7); o valor médio para as nascentes termais é de 896  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em Janeiro e de 1165  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em Junho. Para os restantes pontos de água o valor médio é de 481  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em Janeiro e 606  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em Junho. O aumento registado nas nascentes termais dever-se-á à ocorrência de aquíferos profundos; de tempos de residência da água no aquífero elevados e ascensão rápida da água através de um sistema de fracturação. Para os restantes pontos de água o aumento da Condutividade elétrica dever-se-á a mistura de águas com águas termais (P3 e P4) e à diminuição de caudais, responsável pelo aumento da concentração de sais nas águas.

- O pH também aumentou ligeiramente em Junho face a Janeiro, com duas exceções, N1 e P7; o valor médio do pH para as nascentes termais é de 7,10 em Janeiro, e de 7,70 em Junho. Para os restantes pontos de água, o valor médio em Janeiro é de 6,90 e de 7,20 em Junho. Este aumento poderá estar relacionado com o aumento geral da Temperatura nos pontos de água medidos.

No que respeita às concentrações de Radão, estas diminuíram em todos os pontos de água amostrados, com uma exceção (ponto P7) em Julho face a Janeiro, que poderão ser expli-

## 8 – Considerações finais e Recomendações

cadadas devido a efeitos de diminuição de caudais assim como de mistura de águas mais superficiais, provenientes da intensa precipitação que se fez sentir este ano.

Os pontos que apresentam maiores concentrações de radão nas duas campanhas de campo de Janeiro e Junho são N1 (93,4 Bq/l e 77 Bq/l), N2.2 (69,3 Bq/l e 59,4 Bq/l), NT1 (28,6 Bq/l e 14,6 Bq/l), NT2 (22,4 Bq/l e 17,6 Bq/l), P9 (27,0 Bq/l e 17,1 Bq/l) e P10 (28,6 Bq/l e 23,5 Bq/l).

Para N1 e N2.2 os valores anómalos da concentração de radão, também se explicam à luz da existência de fracturação provável, de orientação N80°E, responsável pelo surgimento de águas com conteúdo neste elemento. Para NT1 e NT2 a explicação é semelhante, com fracturação N25°W responsável pelo surgimento de águas provenientes de aquífero termal.

Os valores médios de concentração determinados para as nascentes hidrotermais de 17,1 Bq/l e 10,8 Bq/l em Janeiro e Junho respetivamente e, 21,2 Bq/l e 18,5 Bq/l para os pontos de águas frias, respetivamente, são mais elevados que os valores médios de concentração determinados por Morgado (2011) na região de Condeixa-a-Nova.

Para o Rádio, os valores máximos de concentração em Janeiro são de 79 mBq/l, 28 mBq/l, 21 mBq/l, 18 mBq/l e 16 mBq/l nos pontos de água N1, P9, P7, P10 e NT1 respetivamente. Os restantes pontos de água apresentam valores quantificáveis pouco expressivos e abaixo do limite de deteção. Em Junho observou-se uma diminuição das concentrações na grande maioria dos pontos de água amostrados, embora tenha havido um aumento considerável em dois pontos de água (NT3 e P10).

Os pontos de N1, P10 e NT3 apresentam, em Junho, valores consideravelmente superiores aos outros pontos amostrados, de 40mBq/l, 50 mBq/l e 80 mBq/l respetivamente. Estes valores anómalos podem ser explicados devido à presença de sistema de fraturas, em NT3 e N1, com orientação N25°W e N80°E respetivamente, responsáveis pelo surgimento de águas mais profundas com conteúdo radiológico e, devido à presença de níveis argilosos na Formação cretácica Arenitos do Carrascal (C<sup>1-2</sup>), também com conteúdo radiológico, para P10.

Os valores médios registados da concentração de rádio são inferiores ao valor determinado por Morgado (2011), com concentração média registada de 70 mBq/l na região de Condeixa-a-Nova. Apenas as nascentes hidrotermais em estudo (Amiera, Bicanho e Azenha) registam valor médio de concentração superior em Junho, de 80 mBq/l.

No que concerne ao Urânio total (U total), os valores mais elevados de concentração de 5,5ppb e 4,5ppb em Janeiro e Junho respetivamente, localizam-se ao longo de uma fratura provável, de orientação N50°W, no sector ligeiramente a sul de Moinho de Almojarife, no ponto P13. Também no sector de Moinho de Almojarife, mas mais a norte, o ponto N2.2 apresenta concentração mais elevada de U total, 2,3ppb em Janeiro e 2,4ppb em Junho,

também devido a fratura provável, de orientação preferencial E-W. Outro ponto de elevada concentração de U total, P7, localizado em Serro Ventoso, pertence à Formação de Arenitos de Boa Viagem (J<sup>4-5</sup>) e apresenta valores de concentração de 5,5ppb e 1,8 ppb em Janeiro e Junho, respetivamente. Esta Formação possui diversos níveis argilosos, que acredita-se serem ricos em elementos radiológicos. Os valores médios de concentração de U total, nas campanhas de Janeiro e Junho, não excedem 1,8 ppb, e são claramente inferiores a valores de concentração médios determinados por Morgado (2011) e Correia Marques *et al.* (1979) em regiões próximas a esta área de estudo.

No que concerne à saúde pública, o cálculo para a dose efetiva para as águas analisadas apresenta resultados abaixo dos limites legais estipulados pelo Decreto-Lei 306/2007 e Norma Comunitária 2013/51/EURATOM de 0,1mSv/ano, no que refere a parâmetros radiológicos, com valor máximo calculado de 0,0161 mSv/ano em Janeiro no ponto N1, e de 0,0167 mSv/ano em Junho no ponto NT3. No entanto aconselha-se cuidado no consumo de água proveniente do ponto N1 por se tratar de nascente na qual há utilização de água para consumo doméstico, pois este ponto apresenta valores de concentração de radão de 93,4 Bq/l e 77,0 Bq/l determinados em Janeiro e Junho respetivamente, perto dos limites legais estipulados de 100 Bq/l.

Recomenda-se ainda estudos futuros mais aprofundados de caracterização hidrogeológica e radiológica na região circundante ao anticlinal de Verride e no Sistema Aquífero Figueira da Foz-Gesteira (07), por se tratar de zonas nas quais a hidrogeologia e tectónica interagem criando zonas de potencial interesse científico e económico (hidrotermalismo, exploração de águas e de elementos radiológicos).

## Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, C., MENDONÇA, J., JESUS, M., GOMES, A., (2000a), *Sistemas aquíferos de Portugal – Orla Ocidental (0)*. Dez. 2000 Instituto da Água. 18/06/2014 <<http://snirh.apambiente.pt/>>
- ALMEIDA, C., MENDONÇA, J., JESUS, M., GOMES, A., (2000b), *Sistemas aquíferos de Portugal – Sistema Aquífero: Figueira da Foz-Gesteira 07*. Dez. 2000 Instituto da Água. 18/06/2014 <<http://snirh.apambiente.pt/>>
- ALMEIDA, C., MENDONÇA, J., JESUS, M., GOMES, A., (2000c), *Sistemas aquíferos de Portugal – Sistema Aquífero: Aluviões do Mondego 06*. Dez. 2000 Instituto da Água. 18/06/2014 <<http://snirh.apambiente.pt/>>
- ALMEIDA, C., MENDONÇA, J., JESUS, M., GOMES, A., (2000d), *Sistemas aquíferos de Portugal – Sistema Aquífero: Verride 08*. Dez. 2000 Instituto da Água. 18/06/2014 <<http://snirh.apambiente.pt/>>
- AZEVEDO, J.M. (2008), *Apontamentos da disciplina de Hidrogeologia Operacional*. Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra.
- AZEVEDO, J.M. (2012), *Cadernos teórico-práticos para apoio à disciplina de Hidrogeologia Aplicada dos Mestrados em Geociências e em Eng<sup>a</sup> Geológica e de Minas*. FCTUC-Universidade de Coimbra.
- ARHCENTRO (2012), *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4: Relatório Base*. 18/06/2014. Agência Portuguesa do Ambiente. <<http://www.apambiente.pt/>>
- BRASSINGTON, R. (1998), *Field Hydrogeology*. John Wiley & Sons. 244 pp.
- Câmara Municipal de Soure, "Freguesia de Samuel", 18/06/2014, [www.cm-soure.pt](http://www.cm-soure.pt)
- CAMPOS, J., (2013), *Hidrogeologia e Biomonitorização de aquíferos Freáticos – Estudo da área de Condeixa-a-Nova e Soure*. Coimbra. Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado.
- CARTA MILITAR DO EXÉRCITO (1983), *Folha n° 239 – Figueira da Foz*, escala 1:25000. Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- CARTA MILITAR DO EXÉRCITO (2001), *Folha n° 249 – Marinha das Ondas*, escala 1:25000. Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.
- CARVALHO, F., OLIVEIRA, J., LOPES, I., BATISTA, A., (2007), *Radioatividade nos principais rios da Beira-Alta*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos – Recursos Hídricos, Volume 28#01, pp. 44-51.
- CONDOMINES, M., GOURDIN, E., GATANIOU, D., SEIDEL, J., (2012), *Geochemical behaviour of Radium isotopes in a coastal thermal system (Balaruc-les-Bains, South of France)*, Elsevier – SciVerse ScienceDirect, pp. 160-176. Acedido em 18/6/2014, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703712005078>
- CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R. (1983), *Hidrologia subterránea*. Barcelona: Ed. Omega.
- CORREIA MARQUES, J., FERREIRA SOARES, A., GODINHO, M., MATOS DIAS, J., CAJÃO, M., (1979), *Contribuição para o estudo da distribuição hidrogeoquímica do urânio na orla meso-cenozoica ocidental portuguesa*. Comunicação aos Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, pp. 151-176.
- CORTEZ, J. (2012), *Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Centro*. Coordenação José António Simões Cortez. Mare Liberum Editora, 526pp.
- DESIDERI, D., MELI, M.A., FEDUZI, L., ROSELLI, C., RONGONI, A., SAETTA, D., (2007), *238U, 234U, 226Ra, 210Po concentrations of bottled mineral waters in Italy and their dose contribution*. Elsevier-ScienceDirect, Journal of Environmental Radioactivity 94, pp. 86-97.
- FERREIRA, A. (2009), *Radioatividade das águas subterráneas da região do Minho*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.
- FERREIRA SOARES, A., MARQUES, J.F., SEQUEIRA, A., (2007), *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000, folha 19-D Coimbra-Lousã*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- FETTER, C.W. (1994), *Applied Hydrogeology*. Ed. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey
- FREEZE, A.R., CHERRY, J.A. (1979), *Groundwater*. Ed. Prentice-Hall. New York
- GALOPIM DE CARVALHO, A.M., (2011), *Dicionário de Geologia*. Âncora Editora, Lisboa, pp. 486.
- GEOLEX, acedido em 18/06/2014, [geoportal.ineg.pt](http://geoportal.ineg.pt)
- GOMES, M., SARAIVA, M., COELHO, F., AZEVEDO, M., NEVES, L., (2007), *A Radioatividade Natural – Exemplos de Aplicação Ambiental dos Isótopos de Radão e de Estrôncio*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Série Didática, Ciências Aplicadas 326, Vila Real, pp.75

- GONÇALVES, C., (2006), *Avaliação dos níveis de radioactividade natural na região da Serra do Buçaco e fatores geológicos condicionantes*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra.
- HIDROLEX, acedido em 18/06/2014, [geoportal.ineg.pt](http://geoportal.ineg.pt),
- HIPÓLITO, J.R., VAZ, A.C., (2011), *Hidrologia e Recursos hídricos*. Coleção Ensino da Ciência e Tecnologia, IST Press – Instituto Superior Técnico, Lisboa, pp 796.
- MANUPELLA, G., ROCHA, R., SOARES, A., MATOS, M., RODRIGUES, A., DEUS, P., OLIVEIRA, J., MOUTERDE, R., PERROT, C., (1976), *Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000, folha 19-C Figueira da Foz*, Serviços Geológicos de Portugal.
- MANUPELLA, G., ZBYSZEWSKI, G., VEIGA FERREIRA, O., (1978), *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000, folha 23-A Pombal*. Serviços Geológicos de Portugal.
- MARQUES J. (2012) “As águas Termais: O Parente Mais Nobre das Águas Subterrâneas de uma dada Região” in Cortez, J (2012), *Águas Minerais Naturais e de Nascente da Região Centro*. Coordenação José António Simões Cortez. Mare Liberum Editora, 71-90pp.
- MORGADO, A., (2011), *Radioatividade natural em águas subterrâneas de domínios sedimentares – o caso da região entre Ribeira e S.Fipo (Condeixa-a-Nova)*. Coimbra. Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado
- NEVES, L., PEREIRA, A., (2004), *Radioatividade natural e ordenamento do território: contributo das Ciências da Terra*. Associação Portuguesa de Geólogos – Revista Geonovas nº 18, pp. 103 a 114
- NEVES, L., PEREIRA, A., GODINHO, M., DIAS, J., (1996), *A radioactividade das rochas como um fator de risco ambiental no território continental português: uma síntese*. V Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente, Vol. I, pp. 641-650.
- PEREIRA, A., DIAS, J., NEVES, L., GODINHO, M., (2001), *O gás radão em águas minerais naturais: avaliação do risco de radiação no balneário das Caldas da Felgueira (Portugal Central)*. Memórias e Notícias, Publicações do Departamento de Ciências da Terra e do Museu Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra, Nº1 (Nova Série), Coimbra, pp. 73-89
- PEREIRA, A., NEVES, L., ABRANTES, L., (2003), *O gás radão em águas subterrâneas: o caso da região de Oliveira do Hospital (Portugal Central)*. IV Congresso Ibérico de Geoquímica e XIII semana de Geoquímica, Coimbra, pp. 304-306.
- PEREIRA, A., NEVES, L., GODINHO, M., DIAS, J., (2003), *Natural Radioactivity in Portugal: Influencing Geological Factors and Implications for Land Use Planning*. Radioprotecção, 2, 2-3, pp. 109-120
- PEREIRA, A., NEVES, L., GONÇALVES, C., (2007), *Radon in groundwater from the Hesperian Massif (Central Portugal)*. Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra.
- PEREIRA, A., PINTO, P., NEVES, L., PEREIRA, M., (2009), *Radionuclídeos em águas subterrâneas de uma região uranífera: o caso da Horta da Vilariça (Norte de Portugal)*. Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra.
- PINTO, P., PEREIRA, A., VICENTE, A., NEVES, L., (2009), *Assessment of natural radioactivity in groundwater in Central Portugal - a preliminary study*. Oslo. 33rd Internaciol Geological Congress.
- RIBEIRO, A., ANTUNES, M., FERREIRA, M., ROCHA, R., SOARES, A., ZBYSZEWSKI, G., Moutinho de Almeida, F., CARVALHO, D., MONTEIRO, J., (1980), *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal, 26<sup>ème</sup> Congrès Géologique International, Paris;
- ROCHA, R., MANUPELLA, G., MOUTERDE, R., RUGET, C., ZBYSZEWSKI, G., (1981), *Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000, folha 19-C Figueira da Foz*. Serviços Geológicos de Portugal.
- SINGHAL, B.B.S., GUPTA, R.P. (1999), *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. – Ed. Kluwer Academic Publishers, 400p
- The handbook of Groundwater Engineering* (1999), Ed. Chief Jaques W. Delleur. CRC Press – Springer-Verlag.
- W.H.O (2011), *Guidelines for Drinking-water Quality (fourth edition)*. World Health Organization, acedido em 18/06/2014, [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/2011/dwq\\_guidelines/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/dwq_guidelines/en/).
- W.H.O (2012), *Uranium in Drinking-water (Background document for development of WHO guidelines for Drinking-water Quality)*. World Health Organization, acedido em 18/06/2014, [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/en/uranium.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/en/uranium.pdf).
- “Zonamento Geológica de Portugal”, 18/06/2014, <<http://web.lettras.up.pt/asaraujo/geofis/t1.html>>