



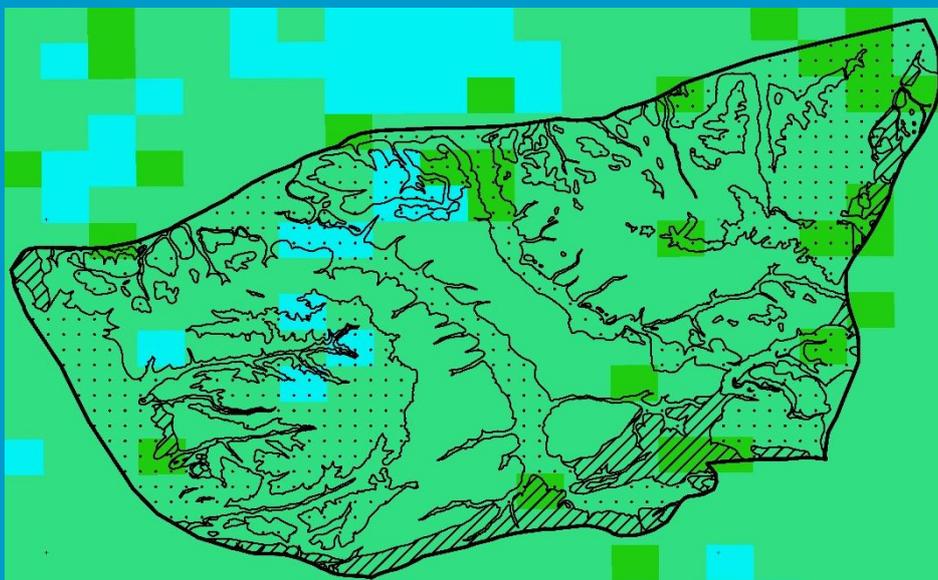
**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**Departamento de Ciências da Terra**

## **A recarga no Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31): processos, zonografia e quantificação**

Rita Isabel Santos Simões

**Mestrado em Geociências**

**Fevereiro, 2018**





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

**A recarga no Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos  
(O31): processos, zonografia e quantificação**

**Rita Isabel Santos Simões**

**Mestrado em Geociências**  
**Área de especialização em Recursos Geológicos**

**Orientadores científicos**

Prof. Doutora Ana Maria Aguiar Castilho Ramos Lopes, DCT, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra

Doutora Paula Cristina Soares Garcia Mendes, ARH-Centro, Agência Portuguesa  
do Ambiente

**Fevereiro, 2018**

## Agradecimentos

No caminho que percorri na realização desta dissertação pude contar com várias pessoas a quem não posso deixar de agradecer pelo apoio que me deram ao longo deste tempo e, dessa forma, aqui fica.

À Professora Doutora Ana Castilho, pela sua orientação, por toda ajuda e disponibilidade, mas mais que isso, pela amizade. Obrigado pelas palavras certas na altura certa.

Ao Professor Doutor José Azevedo, por desde o início me ter dado todo o apoio e me ter incentivado, por toda a disponibilidade e ajuda ao longo deste tempo e acima de tudo pela amizade criada.

À Doutora Paula Garcia, por desde o início me ter recebido na ARH-Centro e ter ajudado em tudo aquilo que foi sendo necessário.

Ao Sr. Pedro Sobral, da ARH-Centro por toda a disponibilidade que mostrou desde o início para ajudar.

Ao Professor Doutor Alcides Pereira pela disponibilidade em ajudar na recolha de elementos durante a execução do trabalho.

A todos os Professores do Departamento de Ciências da Terra com quem cruzei caminho durante estes anos. Por terem contribuído para a minha formação não só académica, mas também como pessoa.

Aos meus pais, António e Lídia, os seres humanos mais maravilhosos que conheço e as duas pessoas sem as quais nada disto seria possível. Devo-lhes o maior obrigado do mundo, por me terem dado todas as oportunidades que eles próprios nunca tiveram, por verem algo mais em mim e por nunca deixarem de acreditar, mesmo nos dias em que eu própria não o conseguia fazer.

Ao meu irmão, Bruno, por me desafiar todos os dias. Por desafiar o meu conhecimento de cultura geral, por desafiar a minha paciência e por desafiar o meu amor por ele. Por sempre ter sido e ainda ser a pessoa para as minhas emergências.

Ao meu namorado, José. Por ser o melhor que eu poderia pedir durante todos estes anos. Um obrigado gigante por me ter provado que é possível ter um namorado, um companheiro de aventuras, um melhor amigo e um colega de trabalho, tudo na mesma pessoa. Obrigado por toda a ajuda nos últimos meses e por ser, quase sempre, a voz da razão na minha cabeça.

À Inês Freitas, por ter sido a minha “*partner in crime*” desde o primeiro dia, pela amizade que, definitivamente, nunca esquecerei. Obrigado por ter sido tantas vezes o meu muro de lamentações e por me ter deixado ser o seu.

Ao Darwin e à Mia, por, inconscientemente, me devolverem a humanidade quando eu própria me sentia a perdê-la, e por me fazerem esquecer dos problemas durante 5 minutos, todos os dias ao chegar a casa.

A toda a minha família, as pessoas mais fantásticas que conheço, por me lembrarem sempre o quão bom é ter uma família grande e que se preocupa connosco.

Devo um agradecimento especial à família da minha segunda casa. Aos meus padrinhos, Luis e Cristina, por me terem tratado sempre como uma filha e aos meus primos/“irmãos de outros pais”. À Ana por ser para mim, desde sempre, um dos maiores exemplos a seguir e por toda ajuda que me deu sempre que precisei. À Maria pela amizade mais antiga do mundo e pela enorme ligação que existe entre nós, que espero nunca perder. Ao Luis Miguel, o pré-adolescente (como gosta de ser referido) mais incrível que já conheci, por todas as lições fantásticas que, com os seus quase 12 anos de vida, me dá todos os dias, e por ainda não sentir vergonha quando a prima o abraça e lhe cheira o cabelo em público.

Ao Jorge e à Bela, por me acolherem na sua casa e me tratarem como família. Obrigado por todas as oportunidades que me deram, que nunca esquecerei e pelas quais lhes serei eternamente grata.

À Inês Carvalhas, pela amizade, pelo apoio e por nunca me deixar estar desanimada demasiado tempo seguido. Obrigado pela grande amiga que é para mim.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram presentes neste percurso, mas que não agradei ainda, o meu enorme obrigado, do fundo do coração.

## Resumo

A presente dissertação tem com principal objetivo a caracterização da recarga do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31) através do conhecimento dos principais processos de recarga que ocorrem na zona; da definição das zonas de recarga direta do sistema aquífero e da sua quantificação. Foi ainda efetuado um estudo das unidades aquíferas suspensas e não confinadas superiores, sobrejacentes ao Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos, de modo a contribuir para o conhecimento do sistema aquífero e promover uma gestão sustentável dos Recursos Hídricos locais.

A quantificação da recarga aquífera foi efetuada recorrendo a diferentes métodos de estimação, o que permitiu a comparação entre diferentes valores finais. Utilizaram-se 4 métodos diferentes para estimar o valor da recarga na zona de estudo: 1) o método de flutuação do nível freático 2) o método do hidrograma de furo; 3) o método do balanço hídrico, quer segundo Thornthwaite e Mather (1955) quer com recurso a operações matemáticas entre mapas no ArcGIS 10.2.2. e 4) o método do balanço de cloretos.

Foram, dessa forma, obtidas estimativas de recarga diferentes, através da aplicação dos diferentes métodos. A partir do método da flutuação do nível freático, numa zona de características semelhantes e nas proximidades da área de estudo, obteve-se um valor entre 150 e 190 mm anuais para a recarga direta das unidades aquíferas superiores (suspensas e não confinadas). Da utilização do método do hidrograma de furo para as condições mais desfavoráveis e as mais favoráveis à recarga aquífera das unidades do sistema aquífero Condeixa-Alfarelos obtiveram-se valores entre 1 e 329 mm anuais, respetivamente. Após a obtenção desses valores foi aplicado o método do balanço hídrico, segundo Thornthwaite e Mather (1955) que originou valores entre os 170 e os 210 mm anuais para o mesmo aquífero dependendo do tipo de solos existente na área e da sua capacidade de água utilizável pelas plantas. Os valores da recarga bruta obtidos pelo método do balanço hídrico, através de operações matemáticas realizadas em malhas (*grids*) idênticas para os atributos da precipitação, evapotranspiração e escoamento, situaram-se entre 100 e 200 mm anuais. Por fim, através da utilização do método do balanço de cloretos a dados de análises de cloretos em 4 estações de monitorização de qualidade de água subterrânea foram obtidos valores 80 e os 230 mm anuais para a recarga líquida.

**Palavras-chave:** hidrogeologia, recarga aquífera, sistema aquífero, Condeixa-Alfarelos

## **Abstract**

This dissertation's main objective is the characterization of the recharge in the Condeixa-Alfarelos Aquifer System (O31) knowing the main recharge processes occurring in the area, designation of the direct recharge areas of the aquifer system and their quantification. It was also carried out a study regarding the superior suspended and unconfined aquifer units overlying the Condeixa-Alfarelos aquifer system, to contribute to the description of the aquifer system and promote sustainable management of local water resources. The quantification of the aquifer recharge was carried out using different estimation methods, which allowed the comparison between different final values. Four different methods were used to estimate the recharge value in the study area: 1) the method of fluctuation of the water table 2) the method of the hole hydrograph; 3) the water balance method, according to Thornthwaite and Mather (1955) or through mathematical operations between maps in ArcGIS 10.2.2. and 4) the chloride balance method. Different recharge estimates were obtained through the application of these different methods. From the groundwater fluctuation method, in an area of similar characteristics and near the study area, a value of 150 to 190 mm per year was obtained for the direct recharge of the upper (suspended and unconfined) aquifer units. From the use of the borehole hydrograph method to identify the most unfavourable and favourable conditions to the aquifer recharge for this specific Condeixa-Alfarelos aquifer system, were obtained values between 1 and 329 mm annually respectively. After obtaining these values, the water balance method was applied according to Thornthwaite and Mather (1955) with final findings of 170 and 210 mm annually for the same aquifer, depending on the type of soils in the area and its capacity of usable water by plants. The gross recharge results obtained by the water balance method through mathematical operations performed in identical grids for the attributes of precipitation, evapotranspiration and surface flow, were between 100 and 200 mm per year. Finally, through the use of the chloride balance method and the chlorite analysis data in 4 groundwater quality monitoring stations, values of 80 and 230 mm per year were obtained.

**Key-Words:** hidrogeology, aquifer recharge, aquifer system, Condeixa-Alfarelos

## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Importância e enquadramento do tema estudado .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3	Revisão teórica .....	3
1.3.1	Modelos conceituais e processos de recarga.....	4
1.3.2	Desafios na estimação da recarga .....	11
1.3.3	Métodos de estimação da recarga .....	13
2.	Metodologias .....	19
2.1.	Trabalho de gabinete .....	19
2.1.1.	Elementos bibliográficos e cartográficos .....	19
2.1.2.	Análise de relatórios de furos de pesquisa e captação de água .....	19
2.2.	Atividades de campo .....	20
2.3.	Análise e processamento de dados obtidos .....	20
2.3.1.	Método das flutuações do nível freático .....	21
2.3.2.	Método do hidrograma de furo .....	22
2.3.3.	Método do balanço hídrico sequencial ao nível do solo .....	24
2.3.4.	Método do balanço hídrico .....	24
2.3.5.	Balanço de massa de cloretos .....	25
3.	Caracterização geral da área em estudo .....	26
3.1.	Caracterização geográfica e administrativa.....	26
3.2.	Topografia e relevo .....	28
3.3.	Descritores meteorológicos e de clima.....	30
3.3.1.	Temperatura .....	30
3.3.2.	Precipitação Atmosférica.....	31
3.3.3.	Evapotranspiração real .....	33
3.3.4.	Escoamento superficial .....	34
3.3.5.	Classificação climática .....	35

3.4. Hidrologia.....	37
3.5. Enquadramento geológico .....	38
3.6. Caracterização do solo.....	43
3.6.1. Tipo de solo .....	43
3.6.2. Uso e ocupação do solo.....	44
3.7. Hidrogeologia regional .....	46
4. Resultados e Discussão .....	50
4.1. Aquíferos suspensos e aquíferos não confinados superiores.....	50
4.2. Estimação da recarga aquífera .....	52
4.2.1. Método da Flutuações do Nível Freático para estimação da recarga em aquíferos não confinados .....	52
4.2.2. Método do Hidrograma de Furo .....	55
4.2.3. Método do Balanço Hídrico .....	61
4.2.4. Método do Balanço de Cloretos .....	68
4.3. Análise de resultados.....	71
5. Conclusões.....	75
<b>Bibliografia .....</b>	<b>76</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - A gestão sustentável de água subterrânea através do balanço dos inputs da recarga para o armazenamento do aquífero (recurso hídrico subterrâneo) contra os outputs para benefícios económicos, ambientais e humanos (sociais) (Hiscock et al., 2012). .....	1
Figura 2 - Tipos de aquíferos e relações inter e intra-aquífero adaptado de (Azevedo, 2015). .....	4
Figura 3 - Representação esquemática dos processos iterativos para desenvolver um modelo conceptual de processos de recarga (adaptado de Healy e Scanlon, 2010). ...	5
Figura 4 - Variáveis tidas em conta para a escolha dos métodos para estimação da recarga. ....	20
Figura 5 - Registo de hidrograma de furo, representando a alteração no armazenamento do aquífero durante um único período de recarga (Hiscock & Bense, 2014). .....	23
Figura 6 - Relação do superavit hídrico com o escoamento superficial e infiltração	25
Figura 7 - Enquadramento geográfico da área de estudo segundo a Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos (NUTS). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de CAOP, 2016).....	26
Figura 8 - Concelhos abrangidos pela área de estudo. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de CAOP, 2016).....	27
Figura 9 - Enquadramento topográfico da área de estudo. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado da Carta Militar de Portugal à escala 1:25000).....	28
Figura 10 - Modelo digital de Terreno. Criado através de dados de altimetria no software ArcGIS 10.2.2.....	29
Figura 11 - Temperatura média do ar (°C). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017). .....	30
Figura 12 - Temperatura do ar, normais climatológicas Coimbra (1981/2010) (IPMA, 2017). .....	31
Figura 13 - Precipitação atmosférica anual média (mm). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).....	32
Figura 14 - Precipitação média mensal, normais climatológicas Coimbra (1981/2010) (IPMA, 2017). .....	32

Figura 15 - Evapotranspiração real média anual (mm). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).....	33
Figura 16 - Escoamento médio anual – precipitação x coeficiente de escoamento. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).....	34
Figura 17 - Escoamento médio anual – modelo de Temez. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).....	35
Figura 18 - Classificação climática Köppen-Geiger de Portugal Continental (adaptado de IPMA, 2017).....	36
Figura 19 - Rede hidrográfica da área de estudo com a delimitação das sub-bacias englobadas. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de Costa, 2017; SNIAmb, 2017). ....	37
Figura 20 - Carta Geológica da área de estudo. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de Costa, 2017; Folhas 19-C e 19-D da Carta Geológica de Portugal). ....	39
Figura 21 - Tipo de solos. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2018). ....	43
Figura 22 - Uso e ocupação do solo Criado no software ArcGIS (CLC, 2012).....	45
Figura 23 - Enquadramento do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos nas Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2018). ....	46
Figura 24 - Área de recarga das unidades aquíferas constituintes do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos. Criado no software ArcGIS 10.2.2. (adaptado de PGBH4, 2002).47	
Figura 25 - Corte hidrogeológico Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (Costa, 2017). ....	48
Figura 26 - Área de recarga das unidades aquíferas suspensas e não confinadas superiores. Criado no software ArcGIS 10.2.2. ....	50
Figura 27 - Localização dos pontos de água (círculos azuis) onde foram realizadas medições dos parâmetros físico-químicos, em junho de 2017. ....	51
Figura 28 - Localização da estação de monitorização, da Rede de Piezometria, utilizada para os cálculos do método das flutuações do nível piezométrico. Imagem retirada de SNIRH (2017). ....	53
Figura 29 - Variação do nível freático (m) na estação de monitorização A ao longo do ano hidrológico 2016/2017.....	54

Figura 30 - Localização das estações de monitorização, da Rede de Piezometria, utilizadas para os cálculos do método do hidrograma de furo. Imagem retirada de <a href="http://snirh.apambiente.pt">http://snirh.apambiente.pt</a> .....	55
Figura 31 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização B entre 1999 e 2017 com representação gráfica de $\Delta h$ . .....	56
Figura 32 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização C entre 2015 e 2017 com representação gráfica de $\Delta h$ . .....	56
Figura 33 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização B ao longo do ano hidrológico 2016/2017 com representação gráfica de $\Delta h$ . .....	57
Figura 34 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização C ao longo do ano hidrológico 2016/2017 com representação gráfica de $\Delta h$ . .....	58
Figura 35 - Capacidade de água utilizável, segundo o European Soil Data Centre (ESDAC) para o nível do solo (Panagos et al., 2012; Tóth et al., 2017). .....	63
Figura 36 - Superavit hídrico. Criado no software ArcGIS 10.2.2. ....	65
Figura 37 - Recarga bruta (potencial) calculada com base na diferença entre o superavit hídrico e o escoamento anual médio de Temez. Criado no software ArcGIS 10.2.2. ....	66
Figura 38 - Recarga bruta (potencial) calculada com base no valor do superavit hídrico e do coeficiente de infiltração. Criado no software ArcGIS 10.2.2. ....	67
Figura 39 - Localização das estações de monitorização, da Rede de Qualidade utilizadas para os cálculos dos balanços de cloretos. Imagem retirada de <a href="http://snirh.apambiente.pt">http://snirh.apambiente.pt</a> .....	68
Figura 40 - Áreas de afloramento dos aquíferos sobrepostas ao mapa da recarga bruta (potencial) calculada com base no valor do superavit hídrico e no coeficiente de infiltração. Criado no software ArcGIS 10.2.2. ....	72

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Métodos de estimação de recarga, tipo de recarga que estimam, dados produzidos após a sua aplicação (recarga,R, infiltração D, e/ou escoamento de base, B), a escala temporal da tua aplicação e a frequência da recolha de dados (m corresponde a múltiplas recolhas de dados, l corresponde a uma única recolha de dados e 0 corresponde à utilização de dados já existentes) (Healy & Scanlon, 2010).....	16
Tabela 2 - Análises obtidas em cinco captações do sistema aquífero (adaptado de Almeida et al., 2000).....	49
Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos medidos in situ.....	52
Tabela 4 - Valores do nível freático na estação A para o ano hidrológico 2016/2017 (SNIRH, 2017) .....	53
Tabela 5 - Valores do nível piezométrico nas Estações B e C para o ano hidrológico 2016/2017. (SNIRH, 2017) .....	57
Tabela 6 - Propriedades hidráulicas das camadas constituintes do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos. ....	59
Tabela 7 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1981-2010 (retirados de IPMA, 2017) .....	61
Tabela 8 - Balanço hídrico ao nível do solo, na área de estudo para uma capacidade de água do solo de 87 mm.....	62
Tabela 9 - Balanço hídrico ao nível do solo, na área de estudo para uma capacidade de água do solo de 66 mm.....	62
Tabela 10 - Balanço hídrico ao nível do solo, na área de estudo para uma capacidade de água do solo de 26 mm.....	63
Tabela 11 - Valores médios de $Cl_{gw}$ nas estações utilizadas para o estudo.....	69
Tabela 12 - Estimativas de valores de recarga (mm) obtidas através da aplicação dos vários métodos utilizados.....	73

# 1. Introdução

## 1.1. Importância e enquadramento do tema estudado

As massas de água subterrâneas constituem, para a sociedade atual, uma importante fonte de recursos. Na verdade, a água subterrânea, é um dos mais importantes recursos naturais utilizados nos mais diversos setores de atividade.

Mundialmente, mais de 2 mil milhões de pessoas dependem da água subterrânea para o seu abastecimento diário (Kemper, 2004).

Dessa forma a gestão das massas de água subterrâneas é de extrema importância. É necessário que se tente ao máximo atingir um equilíbrio, no que toca à exploração destes recursos, entre a quantidade de água que anualmente recarrega um aquífero e a que é descarregada naturalmente ou explorada a partir do mesmo.

A figura 1 ilustra, precisamente, as relações entre as entradas e as saídas de água de um aquífero de forma a estabelecer um equilíbrio no armazenamento e a possibilitar uma boa gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

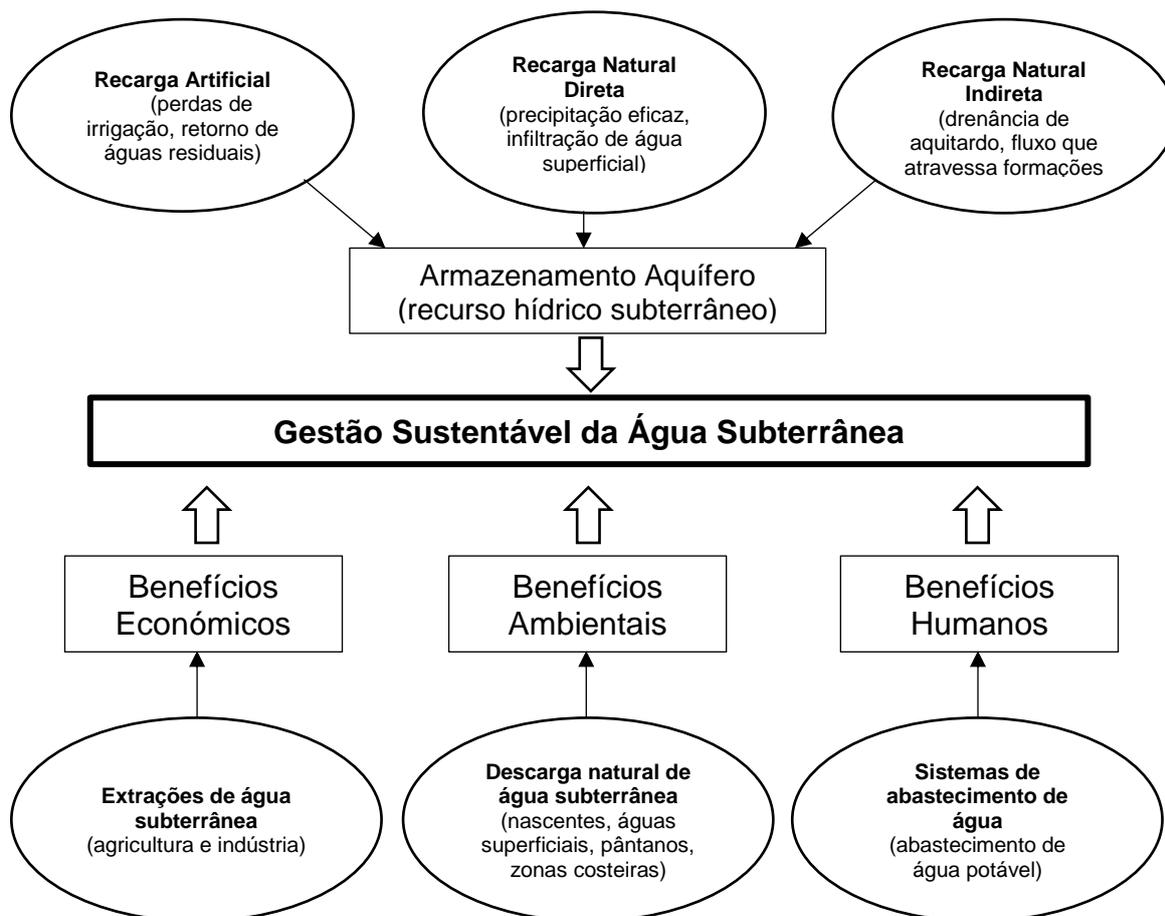


Figura 1 - A gestão sustentável de água subterrânea através do balanço dos inputs da recarga para o armazenamento do aquífero (recurso hídrico subterrâneo) contra os outputs para benefícios económicos, ambientais e humanos (sociais) (adaptado de Hiscock et al., 2012).

Os estudos de recarga são importantes uma vez que constituem ferramentas essenciais para conhecer o estado de uma determinada massa de água subterrânea e poder garantir a gestão sustentável da mesma, uma vez que nos permite quantificar, com algum nível de detalhe, as entradas de água num sistema, para que numa fase posterior estas sejam relacionadas com as saídas do mesmo sistema. É importante ter em conta que os desequilíbrios entre as saídas e as entradas de água, podem ter como resultado, por exemplo, uma perda de produtividade do aquífero (no caso de o valor das saídas exceder o valor das entradas de água no mesmo).

Desta forma, o trabalho aqui desenvolvido pretende contribuir para o estudo da recarga no Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos e nas unidades aquíferas freáticas ou suspensas sobrejacentes, no sentido de possibilitar uma melhor gestão dos recursos hídricos locais.

## **1.2. Objetivos**

### **Principais:**

- Caracterização da recarga do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31);
- Contribuição para o conhecimento do sistema aquífero promovendo uma gestão sustentável dos Recursos Hídricos locais.

### **Secundários:**

- Caracterização física do local;
- Caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos e das unidades suspensas e não confinadas sobrejacentes ao aquífero.
- Definição dos principais processos de recarga que ocorrem na zona;
- Determinação das zonas de recarga direta do sistema aquífero;
- Quantificação da recarga.

### 1.3 Revisão teórica

A água subterrânea é uma fonte essencial de água potável em todo o mundo. Estatísticas completas sobre as extrações e uso de água não estão disponíveis, mas, estima-se que mais de 1,5 mil milhões de pessoas no mundo dependem da água subterrânea para ter água potável. Como dito por Simmers (1990, citado em Healy & Scanlon, 2010), a quantificação das taxas de recarga da água subterrânea (i.e., a taxa a que o aquífero é abastecido de água) é imperativa para uma gestão eficiente da água subterrânea.

Apesar de ser uma das componentes mais importantes em estudos de águas subterrâneas, a recarga é também uma das menos compreendidas, em grande parte porque as taxas de recarga variam bastante no tempo e no espaço e são difíceis de medir diretamente (Healy & Scanlon, 2010).

A recarga é definida como o fluxo descendente de água que atravessa o nível freático e atinge a zona saturada (aquífero), acrescentando água ao armazenamento subterrâneo (Doble & Crosbie, 2016). É normalmente expressa como um fluxo volumétrico, em termos de volume por unidade de tempo ( $L^3/T$ ), tal como  $m^3/d$ , ou então como um fluxo, em termos de volume por unidade de área de superfície por unidade de tempo ( $L/T$ ), tal como  $mm/ano$  (Healy & Scanlon, 2010).

A recarga natural bruta pode ser calculada através da seguinte equação (Delleur, 2006):

$$R_{Bruta} = P - INT - ET_{zns} - ESC_{sup+hip} + \Delta S \quad (1)$$

Em que  $P$  é a precipitação,  $INT$  é a interceção,  $ET_{zns}$  é a evapotranspiração na zona não saturada,  $ESC_{sup+hip}$  é o escoamento superficial e hipodérmico e  $\Delta S$  é a variação do armazenamento de água no solo.

À recarga bruta que atinge o nível freático é deduzida a evapotranspiração efetuada a partir de águas subterrâneas, tanto por perdas por evaporação para o solo ( $E_{\acute{a}guasub}$ ), através da franja capilar, como por uso de água subterrânea pela vegetação ( $T_{\acute{a}guasub}$ ), para se calcular a recarga líquida traduzido pela seguinte equação (Doble & Crosbie, 2016):

$$R_{Líquida} = R_{Bruta} - E_{\acute{a}guasub} - T_{\acute{a}guasub} \quad (2)$$

A recarga pode ainda ocorrer por mecanismos difusos ou pontuais. A recarga difusa é aquela que é efetuada em grandes áreas como resposta à precipitação que se infiltra na superfície do solo e sofre percolação pela zona não saturada até à superfície freática; muitas vezes chamada de recarga local, como referido por Allison (1987) ou recarga direta, assim chamada por Simmers em 1997. Recarga pontual é o movimento da água de corpos de água superficiais, tais como linhas de água, canais ou lagos, para um aquífero subjacente; geralmente este tipo de recarga varia mais no espaço que a recarga difusa (Healy & Scanlon, 2010).

Estritamente falando, a definição de recarga bruta não inclui o fluxo de água para um aquífero a partir de sistemas de água subterrânea adjacentes – fluxo interaquíferos - nem a recarga que pode igualmente advir de formas artificiais, como a recarga artificial ou induzida, efetuada a partir de injeção de água em furos.

A figura 2 ilustra os tipos de aquíferos existentes e as possíveis relações inter e intra-aquíferos, no seu movimento descendente a partir da superfície.

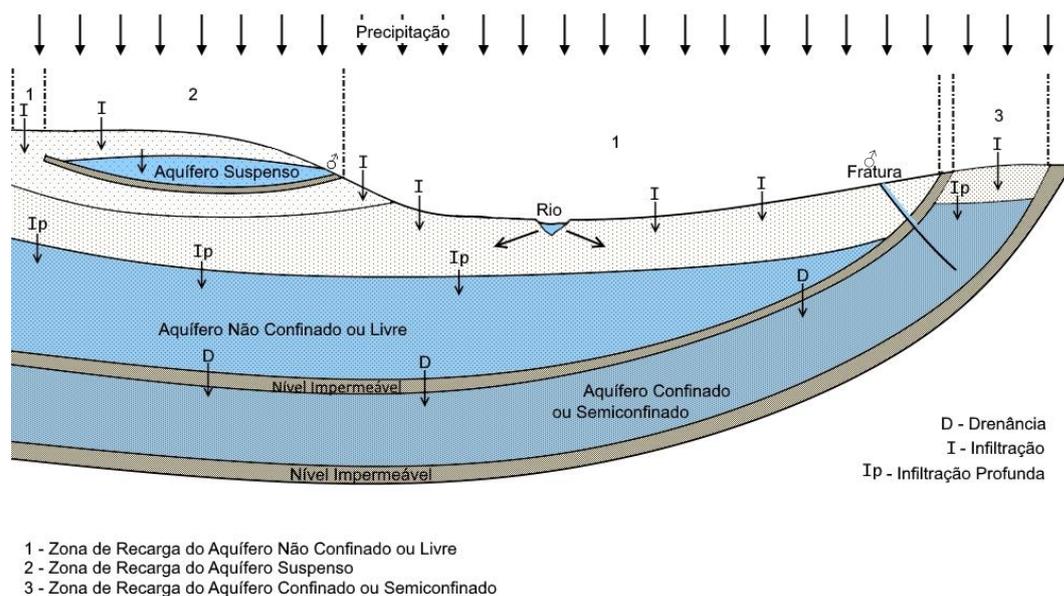


Figura 2 - Tipos de aquíferos e relações inter e intra-aquífero (adaptado de Azevedo, 2015).

### 1.3.1 Modelos conceituais e processos de recarga

Existem vários princípios e teorias subjacentes aos métodos para estimar as taxas de recarga de água subterrânea. Uma compreensão completa dessa mesma teoria e desses princípios é fundamental para a sua aplicação. As boas práticas ditam que as técnicas de estimação de recarga sejam combinadas com modelos conceituais de

processos de recarga, em locais específicos, para assegurar que as premissas subjacentes a essas técnicas sejam consistentes com os modelos conceptuais. Um modelo conceptual deste tipo tenta responder a questões tais como: onde, quando e como ocorre a recarga. O modelo vai, pois, identificar os mecanismos de recarga preponderantes e vai, possivelmente, fornecer estimativas de taxas de recarga iniciais, servindo como guia para a seleção de métodos e para definir enquadramentos de localização e tempo para a recolha de dados (Healy & Scanlon, 2010).

Como indicado por Zheng e Bennet, em 2002, e por Bredehoeft, em 2005, o desenvolvimento de um modelo conceptual de processos de recarga é um passo importante no início de qualquer estudo de recarga; pode ser revisto e ajustado à medida que os dados e as análises adicionais proporcionarem novos conhecimentos do sistema hídrico (Healy & Scanlon, 2010).

O processo de desenvolvimento de um modelo conceptual de processos de recarga encontra-se esquematizado na figura 3.

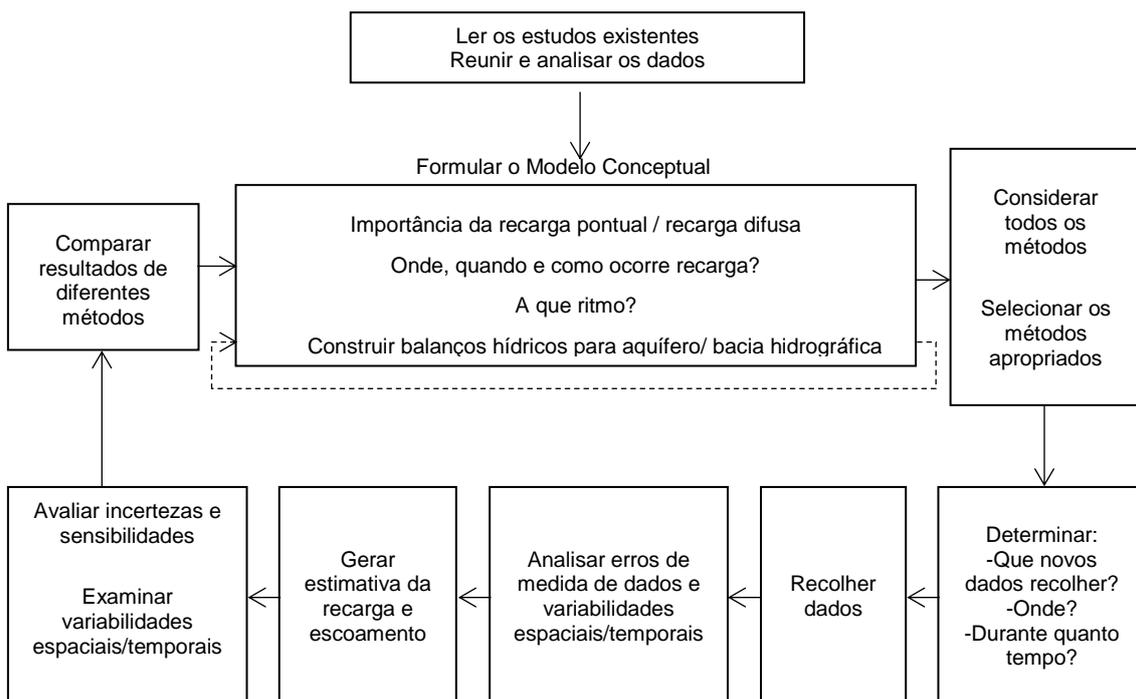


Figura 3 - Representação esquemática dos processos iterativos para desenvolver um modelo conceptual de processos de recarga (adaptado de Healy e Scanlon, 2010).

Os fatores que podem influenciar a definição de um modelo conceptual e as suas implicações para o tema em estudo são os seguintes (Doble & Crosbie, 2016; Healy & Scanlon, 2010):

### **1.3.1.1. Fatores**

#### *1. Variabilidade espacial e temporal da recarga*

As taxas de recarga variam no espaço, quer de forma sistemática quer de forma aleatória. Este facto é tido como verdadeiro, quer para o caso da recarga difusa quer para o caso da recarga pontual. A importância da variabilidade espacial e temporal da recarga deve ser considerada dentro do contexto dos objetivos do estudo. A variabilidade espacial pode não ser crítica para a avaliação de recursos de águas subterrâneas se a taxa média de recarga puder ser determinada para um aquífero inteiro. No entanto, será importante, para avaliar a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação. Assim, métodos que forneçam estimativas pontuais de recarga podem ser apropriados (Healy & Scanlon, 2010).

Em relação à variabilidade temporal, historicamente falando, vários modelos de águas subterrâneas foram desenvolvidos com o pressuposto de que a recarga era constante no tempo. No entanto, as aplicações atuais de modelos conceptuais permitem colocar a recarga a variar no tempo, caso isso seja desejado (Healy & Scanlon, 2010).

#### *2. Clima*

A alteração das condições climáticas é muitas vezes o fator mais importante na variação das taxas de recarga. A precipitação atmosférica, a origem natural da recarga, é a componente dominante do balanço hídrico para a maioria das bacias hidrográficas. Quantidades de precipitação elevadas aumentam a probabilidade de existir recarga, sendo esta apenas limitada temporalmente pela capacidade de armazenamento dos aquíferos (Doble & Crosbie, 2016).

A variabilidade da precipitação é também bastante importante. As variações sazonais, anuais e de longo prazo na precipitação atmosférica, bem como a frequência, duração e intensidade de eventos individuais de precipitação são aspetos que afetam os processos de recarga. As condições para a percolação de água, através da zona não saturada são mais favoráveis quando a quantidade de precipitação é superior à quantidade de evapotranspiração. Em regiões em que a evapotranspiração (ET) é elevada, a quantidade de precipitação que é interceptada e evapotranspirada a partir da zona não saturada é mais elevada. As taxas de evapotranspiração em regiões temperadas seguem uma tendência sazonal, dependendo da radiação solar, da precipitação e do armazenamento de água no solo, tendendo o seu máximo a ocorrer durante os meses de primavera e os mínimos nos meses de inverno e verão.

Se as taxas de evapotranspiração forem bastante uniformes ao longo do ano, a altura mais provável para ocorrer infiltração é entre o inverno e a primavera, quando as taxas de precipitação excedem as taxas de evapotranspiração. A duração e a intensidade de eventos individuais de precipitação podem, também, ter uma grande influência na recarga (Healy & Scanlon, 2010).

### *3. Solos e Geologia*

O tipo de solo ou de rocha aflorante afeta muito ativamente os processos de recarga.

É mais provável que a recarga aconteça em áreas com solos de textura grosseira, como no caso de solos arenosos ou francos, que apresentam maiores taxas de infiltração do que os solos finos, siltosos ou argilosos (Doble & Crosbie, 2016).

Do mesmo modo, sedimentos mais grosseiros, bem calibrados e com reduzida matriz siltosa-argilosa têm uma permeabilidade mais elevada e são capazes de transmitir água rapidamente. A presença destes materiais geológicos promove a recarga, uma vez que a água pode infiltrar-se rapidamente e percolar pela zona das raízes antes sequer de ser absorvida pelas raízes das plantas. Sedimentos mais finos são menos permeáveis, mas são capazes de armazenar quantidades de água maiores. Portanto, em áreas de sedimentos mais finos é espectável um decréscimo da infiltração, um aumento do escoamento superficial e, até certo ponto, um aumento da extração de água da zona não saturada pelas plantas o que origina um decréscimo da recarga relativamente a áreas de sedimentos mais grosseiros (Healy & Scanlon, 2010).

A água que se move através de caminhos hídricos preferenciais, como fissuras, buracos de raízes, cavidades cársticas ou fraturas, atinge mais rapidamente a superfície freática do que a que se movimenta através dos poros existentes na matriz do solo, o que faz com que haja menos perdas de água para a evapotranspiração. Igualmente, em regiões onde afloram rochas muito fissuradas ou carsificadas pode ocorrer uma rápida infiltração da precipitação atmosférica, que é prontamente canalizada para o aquífero subjacente através das fraturas ou cavidades existentes (Healy & Scanlon, 2010).

Outro aspeto que condiciona a infiltração e o escoamento de água é o teor de humidade existente no solo anteriormente a um evento de precipitação. Geralmente um teor de humidade elevado favorece a recarga profunda, mas nos episódios de precipitação em que o solo se encontra previamente saturado ou atinge a saturação existe igualmente um aumento do escoamento. A influência da humidade do solo na recarga perde importância em estudos de longo prazo (Doble & Crosbie, 2016).

A geologia influencia também os processos de descarga e se a taxa de descarga de um aquífero for menor que a taxa de recarga, o armazenamento de água dentro do aquífero aumenta. Este pode atingir um máximo, a partir do qual a recarga adicional não é aceite, independentemente da quantidade de precipitação, conduzindo a um aumento do escoamento (Healy & Scanlon, 2010).

#### *4. Topografia*

A topografia da superfície do terreno desempenha um papel importante para a recarga quer difusa quer pontual.

Declives acentuados tendem a promover taxas de infiltração baixas e taxas de escoamento elevadas e, por oposição, regiões planas que têm fraca drenagem superficial são mais propícias a recarga difusa e podem favorecer situações de inundação (Healy & Scanlon, 2010).

A existência de pequenas depressões, muitas vezes subtis, tem uma influência profunda nas taxas de infiltração e de recarga. Delins *et al.* (2000) mostram que, mesmo com solos altamente permeáveis, depressões ligeiras existentes em regiões de relevo aparentemente uniforme, levavam a que a infiltração (e a recarga) nessas áreas fosse substancialmente maior que no resto do terreno. Dunne *et al.* (1991) afirmam que mesmo com características de superfície uniformes, a taxa de infiltração aparente, ao longo de uma encosta, aumenta na direção dos declives menores, resultado do facto de as zonas de menor declive estarem expostas ao escoamento vindo das zonas de maior declive e também à precipitação. Stonestrom e Harril (2007) referem que o relevo local, a orientação e altitude de cadeias montanhosas são fatores topográficos adicionais que podem afetar os processos de recarga (Healy & Scanlon, 2010).

#### *5. Hidrografia*

Um modelo conceptual de recarga precisa considerar os sistemas de fluxo de água superficial e de água subterrânea e a forma como os mesmos estão ligados. As linhas de água são perenes ou efémeras? Estão a ganhar água (recebendo a partir de descarga de água subterrânea) ou a perdê-la (fornecendo recarga)? Uma única linha de água pode estar a perder água para um aquífero numa secção, mas estar a ganhar água numa outra secção. A diferença de cotas potenciométricas entre a água superficial e a água subterrânea determina, de acordo com a Lei de Darcy, se a água se move desde a superfície para o aquífero ou vice-versa. Estas questões são essenciais e as respostas às mesmas vão ajudar a dar forma ao modelo conceptual (Healy & Scanlon, 2010).

A profundidade da superfície freática é também importante. Se a zona não saturada for pouco espessa, a água que se infiltra pode viajar rapidamente até à superfície freática, ocorrendo recarga em resposta a qualquer grande evento de precipitação, no entanto, o volume de recarga aceita é limitado, podendo haver a rejeição de água infiltrada. Superfícies freáticas pouco profundas são também mais suscetíveis à descarga de água subterrânea pela transpiração das plantas e por escoamento hipodérmico ou de base. Assim, a água que recarrega sistemas aquíferos pouco profundos pode ter tempos de residência reduzidos na zona saturada antes de ser extraída pelas plantas e voltar para a atmosfera.

Em regiões com zonas não saturadas mais espessas é menos provável a ocorrência de eventos de recarga episódicos e é expectável que a recarga seja sazonal e mais constante no tempo, já que as frentes de humedecimento que se movem pela zona não saturada apresentam diminuição da sua velocidade com o aumento da profundidade e demoram muito mais tempo a atingir a superfície freática (Healy & Scanlon, 2010).

#### *6. Vegetação e Uso do Solo*

A existência, densidade e o tipo de vegetação, em conjunto com outros tipos de uso do solo, podem ter efeitos profundos nos processos de recarga, já que influenciam os padrões de interceção e evapotranspiração. Uma superfície de solo com vegetação tem tipicamente uma taxa de evapotranspiração maior (e, por isso, menos água disponível para recarga) do que uma superfície de solo sem vegetação, sob condições similares. A profundidade a que se estendem as raízes das plantas influencia ainda a eficiência com que estas conseguem extrair água (Healy & Scanlon, 2010).

Na maioria das circunstâncias, a influência da vegetação é sazonal; alternando períodos de crescimento e dormência, em que a presença de plantas pode, igualmente, promover a recarga uma vez que a degradação ou o envelhecimento das raízes pode expor cavidades que vão atuar como canais de fluxo preferenciais e promover a infiltração.

A preparação de campos agrícolas para o cultivo pode ter efeitos distintos, por um lado desfazendo crostas no solo e aumentando o potencial para a infiltração e por outro, compactando e destruindo canais de fluxo preferenciais e, portanto, diminuindo a infiltração preferencial.

A irrigação pode desempenhar um papel importante na recarga de água subterrânea. O excedente de água de irrigação é drenado para a zona de raízes ou é capturado em valas de drenagem e constitui uma quantidade significativa de recarga em várias áreas,

especialmente em regiões áridas ou semiáridas, onde as taxas de recarga natural são baixas (Healy & Scanlon, 2010).

A urbanização traz várias mudanças na superfície do terreno que podem promover alterações nos processos de recarga. Estradas, locais de estacionamento e edifícios, constituem zonas impermeáveis que podem inibir a recarga. A existência de escoamento superficial é uma característica comum em paisagens urbanas, este pode levar água a corpos de água superficiais ou galerias de infiltração artificial. No primeiro caso, a recarga para a área é reduzida, mas no segundo caso a recarga pode ser significativa e redirecionada, já que teremos a alteração do padrão de recarga, de uma recarga difusa para uma recarga pontual.

Os sistemas de abastecimento e tratamento de água são artefactos adicionais da urbanização que podem afetar os processos de recarga, quer em termos de fornecimento de água a aquíferos urbanos quer em termos de potencial para contaminação. Estes sistemas consistem em canais abertos ou tubos de água e esgotos. Invariavelmente existem fugas associadas a qualquer sistema de abastecimento, fugas essas que constituem formas de recarga potencial e podem tornar-se efetivamente recarga real (Healy & Scanlon, 2010).

Hoje em dia a detecção remota por satélite pode fornecer informação sobre as características da superfície do terreno e a sua ocupação, tais como, o tipo de uso do solo, o tipo de vegetação, a densidade de cobertura, o índice de área foliar, o que pode ser útil para formular um modelo conceptual (Healy & Scanlon, 2010).

### *7. Ação integrada de múltiplos fatores*

Um modelo conceptual de processos de recarga é formado pela integração dos fatores anteriormente referidos, bem como de outros possíveis fatores, em hipóteses de onde, quando, como e porquê ocorre a recarga. Modelos numéricos ou analíticos de condições climáticas, processos que ocorrem na bacia hidrográfica, fluxo de água superficial ou fluxo de água na zona não saturada são ferramentas úteis para integrar os fatores que afetam o modelo conceptual da recarga (Healy & Scanlon, 2010).

A sugestão da utilização de um modelo numérico em fases iniciais de um estudo de recarga pode parecer pouco usual, uma vez que na maioria das vezes o objetivo específico de um estudo desses é o desenvolvimento de estimativas para utilizar em modelos de fluxo subterrâneo ou comparar com resultados de modelos anteriores. Não obstante, um simples modelo numérico pode ser uma ferramenta útil para identificar mecanismos importantes, avaliar hipóteses incluídas num modelo conceptual, e

determinar localizações e tempos otimizados para a recolha de novos dados. A aplicação de modelos numéricos ou analíticos traz benefícios em todas as fases de um estudo de recarga. Ambos são parte de um processo iterativo através do qual os modelos são constantemente refinados e revistos, enquanto novos dados, interpretações e resultados de simulações se tornam disponíveis (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.1.2 Utilização de Dados Existentes**

Na construção de um modelo conceptual devem ser utilizados todos os dados disponíveis para a área de estudo e áreas em volta da mesma. Muitos dos métodos de estimação de recarga, incluindo modelos de bacia hidrográfica e modelos de fluxo de água subterrânea, podem ser aplicados sem ser necessário recolher novos dados. A análise cuidada de todos os dados existentes precede qualquer decisão de recolha de novos dados. Bases de dados existentes contêm dados climatológicos, dados de fluxo de água subterrânea, uso do solo, níveis piezométricos, dados de qualidade de águas superficiais e subterrâneas e propriedades físicas e hidráulicas dos solos (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.1.3 Comparação entre situações análogas**

Numa primeira avaliação da recarga para um local específico, pode utilizar-se uma estimativa obtida em um local similar. Uma revisão da literatura para locais similares é um esforço adicional que vale a pena. Essa revisão vai beneficiar de um esquema de classificação comum para províncias climáticas/hidrológicas/geológicas, esquema esse que facilita as comparações entre locais e é útil na construção de modelos conceptuais e na seleção de técnicas apropriadas (Healy & Scanlon, 2010).

## **1.3.2 Desafios na estimação da recarga**

### **1.3.2.1 Incerteza nas estimações de recarga**

Existem vários tipos de erros que podem potenciar a existência de incertezas nas estimações de recarga. Um modelo conceptual incorreto, a aplicação imprópria de um método de estimação, um número insuficiente de medições ou erros de medição são alguns dos fatores de contribuem para o aumento do grau de incerteza das estimações de recarga.

Foi sugerido por vários autores (Lerner et al., 1990; Simmers, 1997; Scanlon et al., 2002b; citados em (Healy & Scanlon, 2010) que, como muitos dos erros associados à estimação da recarga não são quantificáveis, assim, é “inteligente” fazer a aplicação de múltiplos métodos para qualquer estudo.

### **1.3.2.2 Escalas espaciais e temporais de estimações de recarga**

As escalas temporais e espaciais são conceitos bastante importantes a ter em conta aquando da seleção de métodos de estimação de recarga. Conhecendo os vários métodos existentes e os dados necessários para a sua aplicação, o utilizador deve avaliar a viabilidade da aplicação de cada um desses métodos no que diz respeito à variabilidade espacial e temporal dos dados, tendo em conta que o mesmo deve fornecer dados num intervalo de interesse.

### **1.3.2.3 Custos ou despesas**

Os diferentes métodos de estimação de recarga têm a si associados diferentes custos ou despesas. Cabe então ao utilizador considerar esse fator, aquando da escolha do(s) método(s) de estimação de recarga, tendo em conta o custo a que vão ser encontradas melhorias a partir do estudo.

### 1.3.3 Métodos de estimação da recarga

Existem numerosos métodos de estimação da recarga hídrica que podem genericamente ser divididos em sete grandes grupos:

- métodos de balanço hídrico;
- métodos de modelação numérica;
- métodos baseados em dados da água superficial;
- métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona não saturada;
- métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona saturada;
- métodos de traçadores químicos;
- métodos de traçadores térmicos.

#### 1.3.3.1 Métodos de balanço hídrico

Os métodos de balanço hídrico representam a classe maior de técnicas para estimar a recarga. Um balanço hídrico representa uma contabilização dos movimentos de entrada e saída de água e das mudanças de armazenamento num volume de controlo. Uma análise simples de balanço hídrico em muitos estudos hidrogeológicos é baseada numa coluna de solo que se prolonga, de cima para baixo, desde a superfície do terreno até uma determinada profundidade (L) como volume de controlo. Esse balanço é traduzido pela seguinte equação:

$$P = ET + \Delta S + ESC_{sup} + I \quad (3)$$

Onde P é a precipitação, ET é a evapotranspiração,  $\Delta S$  é a variação no armazenamento de água na coluna,  $ESC_{sup}$  é o escoamento superficial e I é a infiltração, todos eles dados como taxas por unidade de área de superfície. A infiltração, I, é equivalente à recarga, R, apenas se o fundo da coluna de solo se estender até à superfície freática.

No entanto, as equações de balanço hídrico podem, facilmente, ser personalizadas através da adição ou remoção de termos para se enquadrar às particularidades de um sistema hidrológico (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.3.2 Métodos de Modelação Numérica**

Os modelos de simulação são bastante utilizados em todos os tipos de estudos hidrogeológicos e, muitos deles podem ser utilizados para estimar a recarga. Estes podem fornecer conhecimento importante sobre o funcionamento de um sistema hídrico através da identificação de fatores de afetam a recarga.

A maioria dos modelos de simulação hidrogeológica, incluindo os modelos de bacia hidrográfica e os de fluxo de água subterrânea, é baseada, de alguma forma, em equações de balanço hídrico (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.3.3 Métodos baseados em dados de água superficial**

A utilização de dados de linhas de água, para estimação de taxas de recarga, é uma prática comum em zonas húmidas ou em aquíferos freáticos. A maioria dos métodos baseados em dados da água superficial é fácil de utilizar, mas, a sua aplicação deve ser acompanhada de uma análise cuidada das suposições inerentes aos mesmos. Estes métodos estimam taxas de troca de água entre corpos de água subterrânea e corpos de água superficial. Essa troca pode representar recarga pontual a partir de uma linha de água, ou, descarga de água subterrânea para uma linha de água, a troca reflete recarga difusa que ocorre em áreas próximas (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.3.4 Métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona não saturada**

É possível obter estimativas de recarga através de medições do fluxo de água descendente ou da mudança de armazenamento de água na zona não saturada. Os métodos baseados em recolha de dados físicos na zona não saturada não são das técnicas mais utilizadas, mas oferecem algumas vantagens. Estes métodos fornecem, na verdade, estimativas das taxas de percolação de água em profundidade na zona não saturada. Normalmente é assumido que a água de percolação irá, eventualmente, atingir a superfície freática, ponto a partir do qual se pode considerar recarga. No entanto, a água pode demorar algum tempo grande a fazer esta passagem. Ainda assim, em algumas circunstâncias, tais como o rápido avanço de frentes húmidas desde a superfície do terreno para superfícies freáticas pouco profundas, estes métodos apresentam a capacidade única de fornecer conhecimento detalhado dos processos de recarga e dos fatores de influenciam as taxas de recarga (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.3.5 Métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona saturada**

As técnicas de estimação de recarga baseadas em medições de níveis de água subterrânea estão são as mais utilizadas. A abundância de dados de níveis de água subterrânea existente facilita a aplicação direta destes métodos. O método das flutuações do nível freático, por exemplo, utiliza as variações do nível freático ao longo do tempo para estimar a recarga em aquíferos não confinados. Outros métodos deste género são baseados na equação de Darcy (Healy & Scanlon, 2010).

### **1.3.3.6 Métodos de traçadores químicos**

Existe uma grande variedade de utilizações de traçadores químicos em estudos hidrogeológicos que têm a capacidade de fornecer estimativas quantitativas e qualitativas da recarga e de identificar fontes de recarga. Os traçadores são normalmente iões, isótopos ou gases, que se movem com água que podem ser detetados na atmosfera, nas águas superficiais e nas águas subterrâneas. Segundo a nomenclatura de Scanlon et al (2002b; citado em Healy & Scanlon, 2010), os traçadores podem ser divididos em três categorias: traçadores ambientais naturais, traçadores históricos e traçadores aplicados.

O traçador mais utilizado é o cloreto (Cl<sup>-</sup>), através do método do balanço de cloretos.

### **1.3.3.7 Métodos de traçadores térmicos**

Tal como referido por Ingerbritsen et al. (2006; citado em Healy & Scanlon, 2010), o fluxo de calor na subsuperfície está estreitamente ligado ao movimento de água. Como tal, o fluxo de calor tem sido bastante utilizado em estudos de águas subterrâneas.

Tal como com os traçadores químicos, as tendências de variação espacial ou temporal nas temperaturas superficiais e subterrâneas podem ser utilizadas para inferir taxas de movimentação de água (Healy & Scanlon, 2010). Dessa forma têm sido utilizadas aproximações para estimar a recarga através de traçadores térmicos.

A tabela 1 apresenta os diferentes métodos de estimação de recarga existentes, bem como o tipo de recarga que estimam, os dados produzidos após a sua aplicação (Recarga, Infiltração e/ou Escoamento de Base), a escala temporal da tua aplicação e a frequência da recolha de dados.

Tabela 1 - Métodos de estimação de recarga, tipo de recarga que estimam, dados produzidos após a sua aplicação (recarga, R, infiltração I, e/ou escoamento de base, B), a escala temporal da tua aplicação e a frequência da recolha de dados (m corresponde a múltiplas recolhas de dados, l corresponde a uma única recolha de dados e 0 corresponde à utilização de dados já existentes) (adaptado de Healy & Scanlon, 2010).

Método	Escala Temporal										Frequência de Recolha de Dados	
	Focada	Difusa	Recarga, Infiltração e/ou Escoamento de Base	Evento/Diário	Semanal	Sazonal	Anual	Multianual	Decenal	Milenar		Regular/Estável
<b>Balanço Hídrico (BH)</b>												
aquífero	X	x	R, B	x	x	x	x				x	m
coluna de solo		x	R, I	x	x							m
bacia hidrográfica	X	x	R, I, B	x	x	x	x					m
linha de água	X	x	R, I, B	x	x							l,m
<b>Modelos numéricos</b>												
BH do solo na ZNS		x	R, I	x	x							0,l,m
Equação de Richards na ZNS		x	R, I	x	x							0,l,m
Bacia hidrográfica	X	x	R, I, B	x	x							0,l,m
Fluxo água subterrânea	X	x	R, B	x	x	x	x				x	0,l,m
Bacia hidrográfica/água subterrânea combinadas	X	x	R, B	x	x							0,l,m
Empírico	X	x	R				x	x			x	0
<b>Métodos de Darcy</b>												
ZNS		x	I	x	x							m
Gradiente de Unidade na ZNS		x	I								x	l
Água subterrânea	X	x	R	x	x	x	x					m
Água superficial/água subterrânea	X		R	x	x							m

Tabela 1 – Continuação.

<i>Método</i>	<i>Tipo</i>		<i>Escala Temporal</i>								Frequência de Recolha de Dados	
	Focada	Difusa	Recarga, Infiltração e/ou Escoamento de Base	Evento/Diário	Semanal	Sazonal	Anual	Multianual	Decenal	Milenar		Regular/Estável
<b>Métodos ZNS/água subterrânea</b>												
<i>Plano Fluxo-zero</i>		x	I	x	x							m
<i>Lisímetro</i>		x	I	x	x							m
<i>Flutuações do nível freático</i>		x	I	x	x	x						m
<b>Métodos baseados na água superficial</b>												
<i>Infiltrómetro</i>	X		R, I, B	x								I
<i>“Step-response function”</i>	x		R	x	x							
<i>Duração do Fluxo</i>		x	B					x	x			0
<i>“Separação” do Hidrograma (SH)</i>		x	B					x	x			0
<i>Deslocamento da Curva de Recessão</i>		x	R, B					x	x			0
<i>SH químico</i>		x	B	x	x	x	x	x	x			m
<i>Injeção de traçador</i>		x	B	x								m

Tabela 1 – Continuação

Método	Tipo		Escala Temporal									Frequência de Recolha de Dados	
	Focada	Difusa	Recarga, Infiltração e/ou Escoamento de Base	Evento/Diário	Semanal	Sazonal	Anual	Multianual	Decenal	Milenar	Regular/Estável		
<b>Métodos de Traçadores</b>													
Cloretos ZNS		x	I						x	x	x	x	I
Trítio ZNS		x	I						x	x			I
Cloro-36 ZNS		x	I						x	x			I
Aplicados ZNS	x	x	I	x	x	x	x	x					m
Térmicos ZNS		x	I		x	x						x	m
Cloretos água subterrânea	x	x	R							x	x	x	I
Carbono-14 - água subterrânea	x	x	R							x	x	x	I
Trítio - água subterrânea	x	x	R						x	x			I
Cloro-36 - água subterrânea	x	x	R						x	x			I
CFC - água subterrânea		x	R						x	x			I
SF <sub>6</sub> - água subterrânea		x	R						x	x			I
Trítio/Hélio-3 - água subterrânea		x	R						x	x			I
Aplicados - água subterrânea	x	x	R	x	x	x	x						m
Térmicos - água superficial/ água subterrânea	x		R	x	x	x							m

## **2. Metodologias**

Este capítulo apresenta, de forma sintetizada, as diferentes etapas e processos que estiveram ligados à realização da presente dissertação, bem como as metodologias adotadas.

As etapas de trabalho podem então ser divididas em 1) trabalho de gabinete, nomeadamente com a consulta de elementos bibliográficos, cartográficos e análise de relatórios de sondagens de pesquisa e de captação de água; 2) trabalho de campo, incluindo reconhecimento geológico e hidrogeológico, com inventariação de pontos de água (poços, furos...); 3) análise e processamento dos dados obtidos; 4) redação da dissertação.

### **2.1. Trabalho de gabinete**

#### **2.1.1. Elementos bibliográficos e cartográficos**

Na fase inicial do trabalho foi feita essencialmente uma pesquisa bibliográfica, que incluiu documentos disponíveis sobre a área de estudo, nomeadamente o Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos Rios Vouga, Mondego e Lis integradas na Região Hidrográfica 4 (PGBH4) (APA, 2012) e publicações sobre a estimacão da recarga, disponíveis em formatos diversos.

Foi igualmente feita a consulta de elementos cartográficos existentes para a zona de estudo, como as folhas nº230 (Coimbra), nº240 (Montemor-o-Velho), nº241 (Coimbra Sul), nº250 (Soure) e nº251 (Condeixa-a-Nova) da Carta Militar de Portugal à escala 1:25000, série M888 (Instituto Geográfico do Exército, 2002); e as folhas 19-C (Figueira da Foz) e 19-D (Coimbra-Lousã) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000.

Estes documentos permitiram efetuar um reconhecimento inicial da zona de estudo em aspetos como a geologia, hidrogeologia, climatologia, uso e ocupação dos solos e ajudaram a definir a metodologia a utilizar para o cálculo da recarga.

#### **2.1.2. Análise de relatórios de furos de pesquisa e captação de água**

O presente trabalho contou com o apoio da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) através da Administração da Região Hidrográfica do Centro (ARH Centro) o que possibilitou a consulta de elementos hidrogeológicos referentes a sondagens realizadas

para pesquisa e captação de água, efetuadas no Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos e na região circundante.

## 2.2. Atividades de campo

Numa primeira fase, o trabalho de campo consistiu, por um lado em reconhecer as diferentes unidades geológicas e hidrogeológicas presentes na zona em estudo, tendo sido dado ênfase às unidades dominantes do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos, e por outro lado, em inventariar os pontos de água nessa mesma área, nomeadamente linhas de água, nascentes, furos, poços, entre outros.

Numa segunda fase do trabalho foram selecionados alguns dos pontos de água anteriormente referidos e foram realizadas medições de parâmetros físico-químicos no campo, nomeadamente os valores de temperatura (°C), condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH e, em alguns casos, a profundidade da água (nomeadamente nos poços) de forma a ser possível calcular o nível freático.

## 2.3. Análise e processamento de dados obtidos

O processo de escolha dos métodos encontra-se esquematizado na Figura 4.

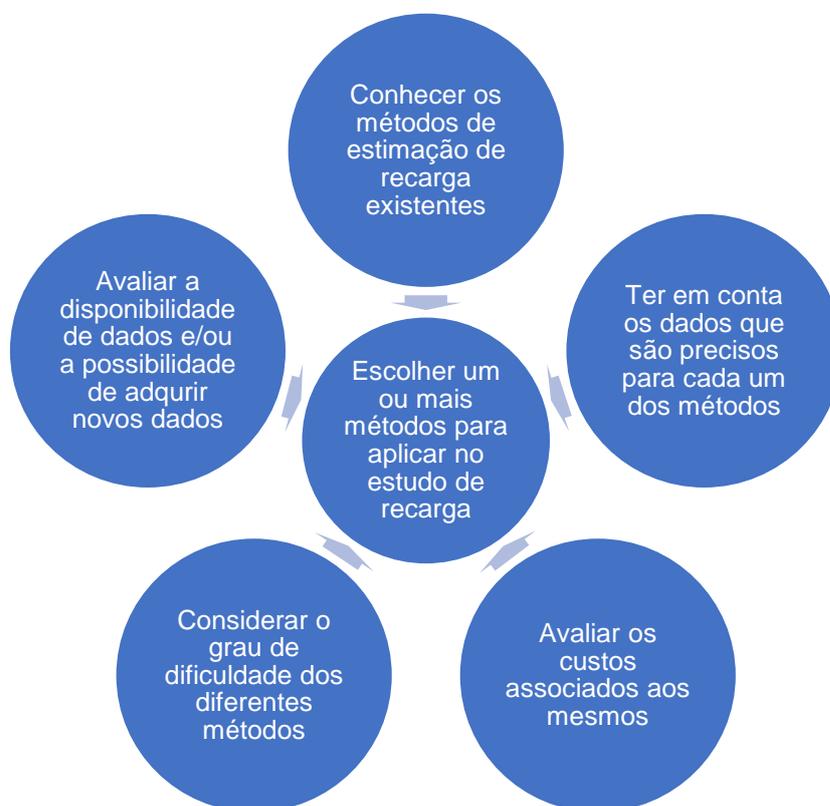


Figura 4 - Variáveis tidas em conta para a escolha dos métodos para estimativa da recarga.

Após a análise dos diferentes métodos para a estimação da recarga hídrica e os dados existentes, optou-se pela utilização dos métodos que possibilitavam o uso de dados de vários tipos (físicos, químicos e de balanço hídrico) de modo a estimar a recarga e a comparar os resultados dessas estimativas.

Assim, foram selecionados 4 métodos diferentes para usar na estimação da recarga do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos: o método de flutuação do nível freático, o método de hidrograma do furo, o método do balanço hídrico, aplicado de duas formas diferentes, e o método do balanço de cloretos.

### **2.3.1. Método das flutuações do nível freático**

O método das Flutuações do Nível Freático para estimação de recarga foi proposto por Meinzer e Stearns (1929) e continua a ser bastante utilizado devido à sua simplicidade (Healy & Cook, 2002; citado em Crosbie et al., 2015).

Este método é usado para calcular a recarga num aquífero de natureza suspensa e/ou não confinada e assume que uma subida do nível hidrostático, medida em piezómetros ou observada em poços, é o resultado de uma subida no armazenamento do aquífero não confinado e corresponde a uma recarga a partir da precipitação atmosférica. A variação do nível hidrostático é então multiplicada pelo armazenamento do aquífero, que neste caso se considera igual à cedência específica  $S_y$ , para obter uma taxa de recarga (Brown et al., 2006). A relação entre a recarga ( $R$ ), a variação do nível freático ( $\Delta h$ ) e o armazenamento ( $S=S_y$ ) é mostrada pela seguinte equação:

$$R = \Delta h \times S_y \quad (4)$$

Este método é particularmente eficaz em áreas com uma quantidade de precipitação elevada durante o inverno e com superfície freática pouco profunda, o que pode levar a recargas episódicas que podem ser reportadas quase instantaneamente (Armstrong e Narayan, 1998; citado em Brown et al., 2006).

A profundidade da superfície freática é, precisamente, uma limitação deste método no caso de se querer saber a recarga induzida por um episódio de precipitação, já que, se a profundidade for excessiva a resposta da superfície freática à precipitação vai sofrer um atraso e, assim, as flutuações vão ser atenuadas e a recarga será subestimada.

### 2.3.2. Método do hidrograma de furo

Este método fornece geralmente meios convenientes para calcular a separação da precipitação efetiva direta, e o escoamento superficial, hipodérmico e de base em caudais de linhas de água.

Do mesmo modo considera-se que as flutuações em hidrogramas de fluxo obtidos em piezómetros podem representar as alterações no armazenamento do aquífero. Assim, tal como representado na Figura 5, a multiplicação da amplitude da alteração do nível da água,  $\Delta h$ , pelo coeficiente de armazenamento do aquífero fornece um valor para a recarga líquida que atingiu o aquífero durante uma época ou um episódio de recarga. A recarga total é igual à adição da recarga líquida às saídas de água subterrânea (escoamento de base, encontrado pela separação do hidrograma e nascentes) (Hiscock & Bense, 2014).

O método é útil na preparação de um balanço hídrico preliminar de uma captação ou para suportar uma modelação de águas subterrâneas regional, mas, é limitada pela necessidade de uma boa distribuição de furos de observação que captem nas unidades hidrogeológicas em estudo (Hiscock & Bense, 2014).

Segundo Hiscock e Bense (2014), a recarga líquida vai ser então calculada através da seguinte expressão:

$$R = \Delta h \times S \quad (5)$$

Onde R é a recarga líquida,  $\Delta h$  é a amplitude da subida do nível de água subterrânea e S é o coeficiente de armazenamento do aquífero. A Figura 5 representa a alteração do nível de água visível no registo do hidrograma de furo.

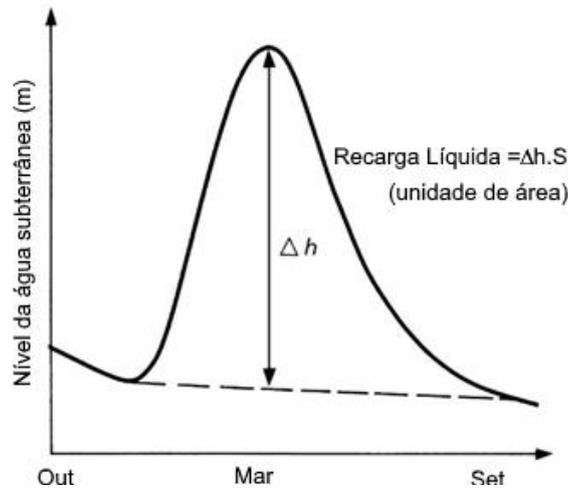


Figura 5 - Registo de hidrograma de furo, representando a alteração no armazenamento do aquífero durante um único período de recarga (Hiscock & Bense, 2014).

No caso de um sistema aquífero multicamada, constituído por aquíferos confinados ou semiconfinados, o valor de  $S$  a utilizar na equação anteriormente referida terá de corresponder ao  $S$  do sistema aquífero. Segundo Jorgensen (1980; citado em Batu 1998), o coeficiente de escoamento de um sistema multicamada pode ser considerado igual à soma dos coeficientes de escoamento de cada uma das camadas. Assim, o coeficiente de escoamento do sistema pode ser traduzido por:

$$S_{sistema} = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (6)$$

Tendo em conta que o valor de  $S$  no caso de aquíferos confinados é:

$$S = S_s \times b \quad (7)$$

Em que  $b$  corresponde à espessura do aquífero confinado (L) e  $S_s$  é o armazenamento específico da unidade aquífera confinada em questão ( $L^{-1}$ ), então:

$$S_{sistema} = S_{s1}b_1 + S_{s2}b_2 + \dots + S_{sn}b_n \quad (8)$$

### 2.3.3. Método do balanço hídrico sequencial ao nível do solo

A recarga pode também ser deduzida através do excedente calculado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) para o tipo de solo existente na superfície e a sua capacidade de água utilizável pelas plantas e de onde se calcula a evapotranspiração real.

### 2.3.4. Método do balanço hídrico

A recarga foi calculada ainda através do método do balanço hídrico, de dois modos diferentes.

O primeiro utilizou informação disponibilizada pelo Atlas Digital do Ambiente (SNAmb, 2017) para calcular a recarga através da equação de balanço hídrico apresentada em 1. Para tal construíram-se ficheiros *raster* a partir da precipitação, evapotranspiração real, escoamento médio anual (quantidade de água na rede hidrográfica segundo modelo Temez) (SNAmb, 2017). Em seguida, calcularam-se os ficheiros *raster* resultantes da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração, e a diferença entre este resultado e o escoamento médio anual para cada bacia hidrográfica, de modo a calcular o excedente disponível para infiltração. Considerou-se que a evapotranspiração ocorria simultaneamente à precipitação ou que esta se fazia à custa da precipitação. Assim, a água que escoava era a sobrança desta diferença e tinha um valor fixo por bacia hidrográfica (escoamento de Temez). A infiltração corresponderia à água que não era evaporada nem transpirada e não sofria escoamento superficial. Os resultados foram apresentados em elementos gráficos construídos no *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2017).

No segundo modo, considerou-se que, do valor da precipitação que excede a evapotranspiração, isto é a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração, existe uma percentagem que sofre escoamento superficial e outra que infiltra, conforme o tipo de solo, o uso ou ocupação do solo, o declive da superfície, entre outros fatores. A quantidade de água total que pode sofrer escoamento superficial ou infiltração corresponderia assim ao *superavit* hídrico. Se se considerar o coeficiente de escoamento com equivalente da contribuição relativa do escoamento superficial (em % do *superavit*) então o coeficiente de infiltração será o excedente, calculando-se a recarga bruta (potencial) através da quantidade de água que permanece disponível para a infiltração (Figura 6).

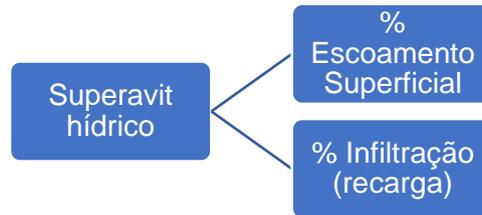


Figura 6 - Relação do superavit hídrico com o escoamento superficial e infiltração

### 2.3.5. Balanço de massa de cloretos

O cálculo da recarga aquífera através do balanço de cloretos é um método que tem sido utilizado há muitos anos e ainda continua a ser utilizado, por ser conceptualmente simples e por ser barato de implementar (Crosbie, Davies, Harrington & Lamontagne, 2015).

O princípio em que se baseia este método é o facto de a evapotranspiração remover água do sistema hídrico, concentrando assim os cloretos na água subterrânea quando comparado com a água da chuva (Crosbie et al., 2015).

Segundo Wood (1999), a base fundamental deste método diz que o fluxo de massa de água que atravessa o plano da superfície freática pode ser calculado se:

- os cloretos na água subterrânea tiverem origem somente na precipitação atmosférica, que cai diretamente nas áreas de recarga do aquífero;
- os cloretos se conservarem no sistema hídrico;
- o fluxo da massa de cloretos não variar no tempo;
- não houver reciclagem ou concentração de cloretos dentro do aquífero por outros processos.

Se assim for, segundo o mesmo autor, a recarga é calculada através da equação:

$$R = P \times \frac{Cl_p}{Cl_{gw}} \quad (9)$$

Onde R corresponde à recarga anual estimada ( $L^3.L^{-2}.T^{-1}$  ou  $LT^{-1}$ ), P à precipitação média anual ( $L^3.L^{-2}.T^{-1}$  ou  $LT^{-1}$ ),  $Cl_p$  à concentração de cloretos na precipitação atmosférica ( $ML^{-3}$ ) e  $Cl_{gw}$  à concentração média de cloretos na água subterrânea ( $ML^{-3}$ ), sendo que M representa unidades de massa, T de tempo e L de comprimento, em unidades consistentes, de modo a formar equações dimensionalmente corretas.

### 3. Caracterização geral da área em estudo

Neste capítulo será apresentada uma caracterização da região em estudo, sobretudo nas vertentes: 1) geográfica e administrativa; 2) topográfica; 3) climatológica; 4) hidrográfica; 5) geológica; 6) hidrogeológica e 7) pedológica e 8) relativa ao uso e ocupação do solo.

#### 3.1. Caracterização geográfica e administrativa

A área de estudo localiza-se em Portugal Continental, na zona Centro. Encontra-se enquadrada nas hierarquias da NUTS (Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos) da seguinte forma: Portugal Continental (NUTS I) → Centro (NUTS II) → Região de Coimbra (NUTS III) (Figura 7).

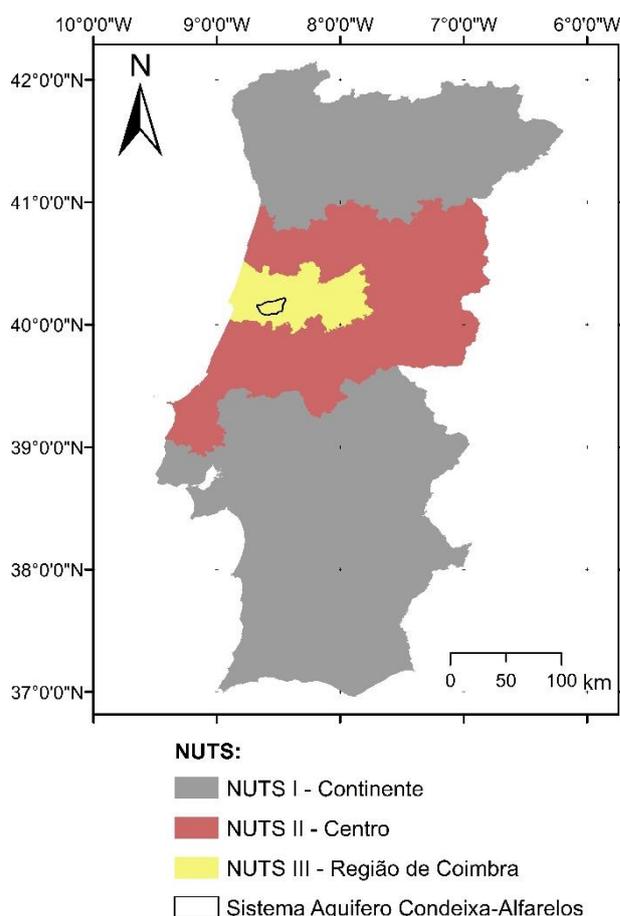


Figura 7 - Enquadramento geográfico da área de estudo segundo a Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos (NUTS). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de CAOP, 2016).

A área divide-se pelos concelhos de Coimbra, Condeixa-a-Nova, Montemor-o-Velho e Soure (Figura 8).

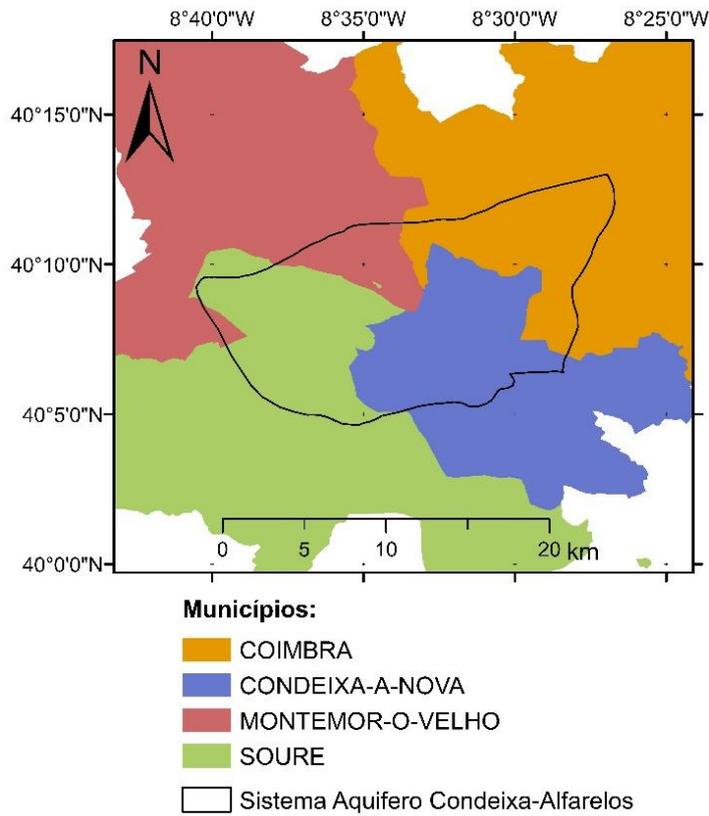


Figura 8 - Concelhos abrangidos pela área de estudo. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de CAOP, 2016).

### 3.2. Topografia

A área de estudo coincide com os limites do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31). Apresenta uma área plana de cerca de 185 km<sup>2</sup> e encontra-se representada nas folhas nº230 (Coimbra), nº240 (Montemor-o-Velho), nº241 (Coimbra Sul), nº250 (Soure) e nº251 (Condeixa-a-Nova) da Carta Militar de Portugal à escala 1:25000, série M888 (Instituto Geográfico do Exército, 2002). Na Figura 9 é possível observar a representação dessas mesmas folhas dentro da área estudada.

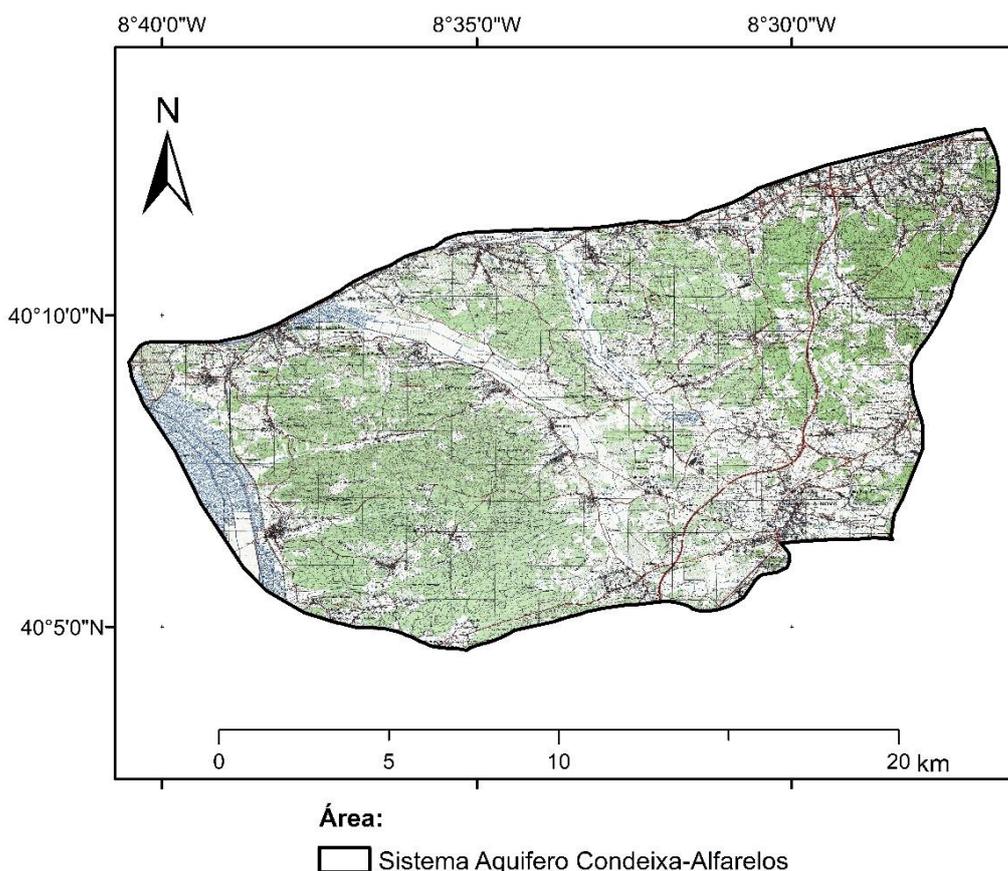


Figura 9 - Enquadramento topográfico da área de estudo. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado da Carta Militar de Portugal à escala 1:25000).

Esta área está limitada a N pela margem esquerda do Rio Mondego, a NE pela cidade de Coimbra, a SE pela vila de Condeixa-a-Nova, a SW pela localidade de Espírito Santo e a NW pela localidade de Alfarelos.

Apesar de na zona central da área em estudo o relevo ser relativamente pouco pronunciado, com cotas que não ultrapassam os 80 m, as zonas mais a W/SW e E/NE apresentam relevos maiores. No sector E/NE as cotas rondam os 180-200 m, sendo precisamente nessa zona que se encontram os pontos mais elevados, enquanto que no sector W/SW a topografia apresenta valores de cota de 100 a 120 m podendo atingir valores de 140 m, em alguns casos.

Os valores de cota mais baixos encontram-se junto às linhas de água e apresentam um valor de cerca de 6 a 12 m. Tudo isto é possível verificar através da observação do Modelo Digital de Terreno (MDT) apresentado na Figura 10.

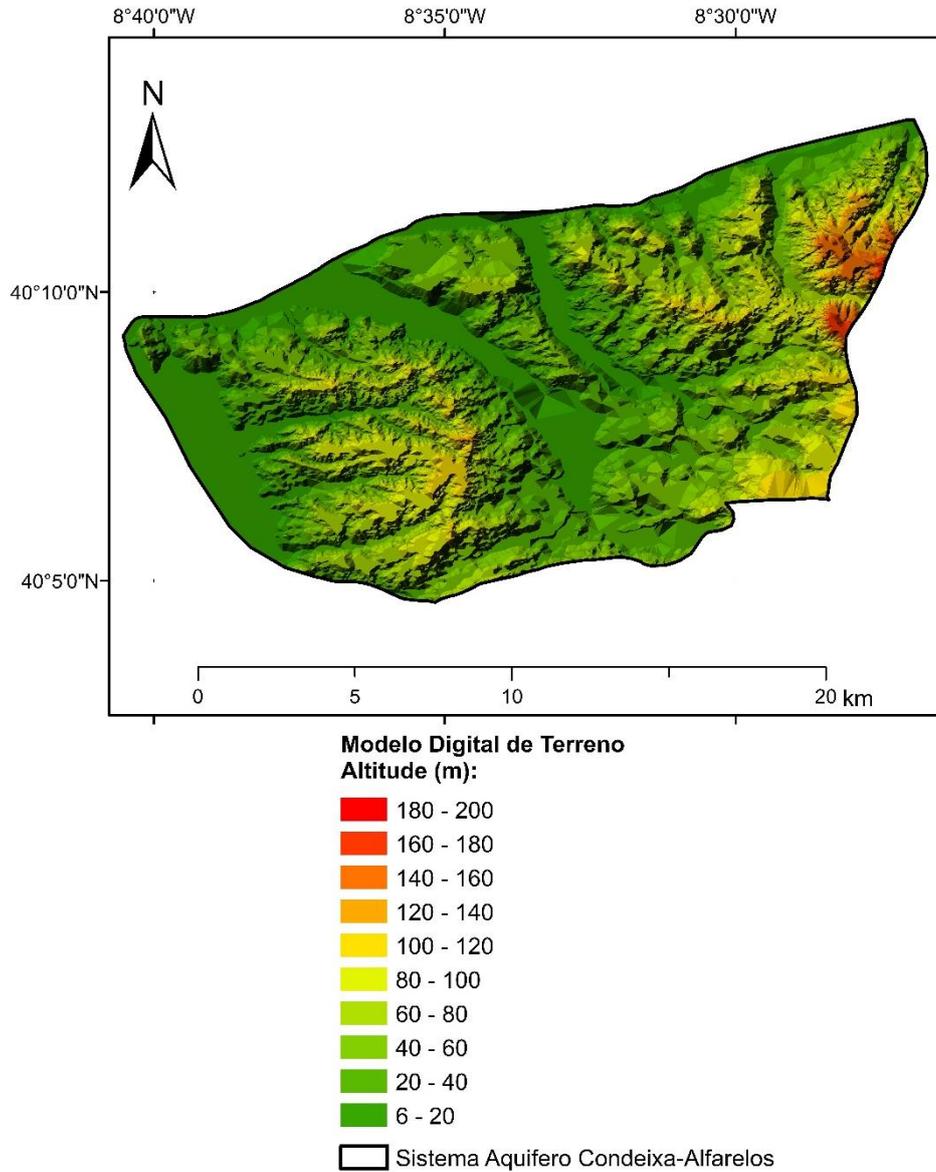


Figura 10 - Modelo digital de Terreno. Criado através de dados de altimetria no software ArcGIS 10.2.2.

### 3.3. Descritores meteorológicos e de clima

O estudo do clima da região do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos envolve a caracterização de alguns parâmetros meteorológicos, nomeadamente a temperatura e a precipitação, e a sua sazonalidade. Para facilitar esse estudo foram elaborados elementos gráficos dos parâmetros meteorológicos mais importantes, a partir de informação disponibilizada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, 2017) e do Atlas do Ambiente Digital (SNIAmb, 2017) utilizando o *software* ArcGIS 10.2.2.

#### 3.3.1. Temperatura

A região alvo de estudo apresenta uma temperatura média anual que se situa entre os 15 e os 16 °C, segundo os dados disponibilizados no Atlas do Ambiente (temperatura média diária do ar, valores médios anuais, para o período 1931-1960) (SNIAmb, 2017) (Figura 11).

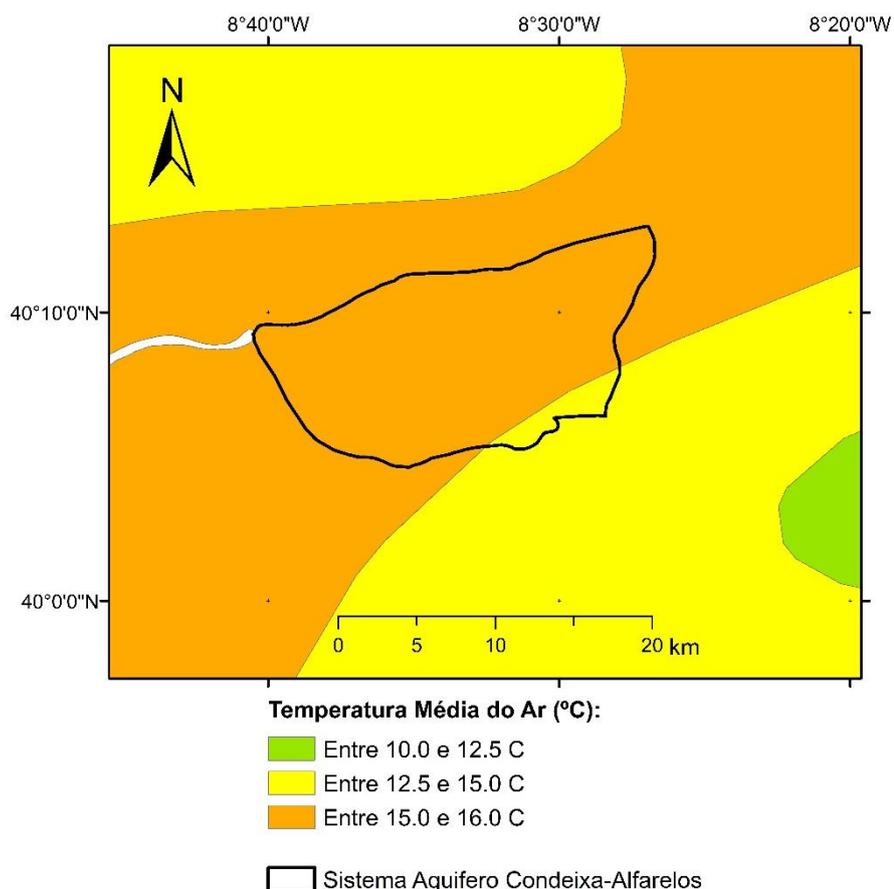


Figura 11 - Temperatura média do ar (°C). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).

As temperaturas mais elevadas são registadas entre os meses de julho e setembro, com temperaturas máximas a rondar os 28 a 29°C, e as mais baixas entre os meses de dezembro e fevereiro, com temperaturas mínimas entre 5 e 6°C (Figura 12).

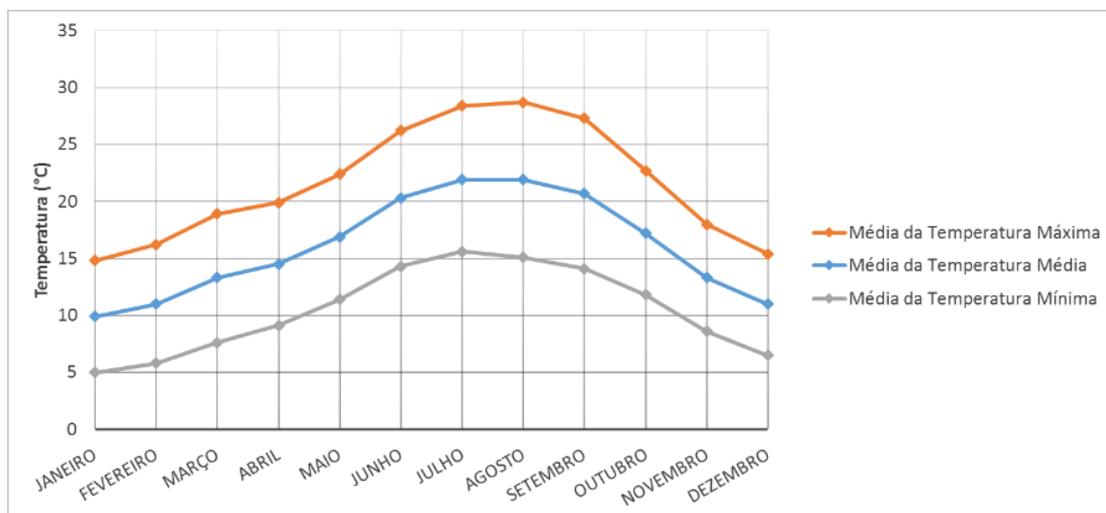


Figura 12 - Temperatura do ar, normais climatológicas Coimbra (1981/2010) (IPMA, 2017).

### 3.3.2. Precipitação Atmosférica

A precipitação atmosférica anual média na zona de estudo assume um valor entre 900 e 1100 mm de acordo com os dados disponibilizados no Atlas do Ambiente (Precipitação total valores médios anuais (mm) para o período 1931-1960) (Figura 13), sendo o valor da precipitação anual média referido pelo IPMA para a estação meteorológica de Coimbra para o período de 1981-2010 (dados provisórios) de 886 mm (IPMA, 2017).

Em anos húmidos, os valores de precipitação atmosférica anual média podem atingir os 1250 mm, enquanto que, nos anos secos, precipitações entre 650 e 700 mm são comuns (PGBH4,2012). O gráfico da Figura 14 permite ainda verificar que os meses com menor valor de precipitação atmosférica se situam entre junho e agosto, com valores de precipitação a variar entre 10 e 30 mm, e os meses com maior precipitação correspondem ao período entre outubro e janeiro, com valores entre 100 e 130mm, aproximadamente (IPMA, 2017).

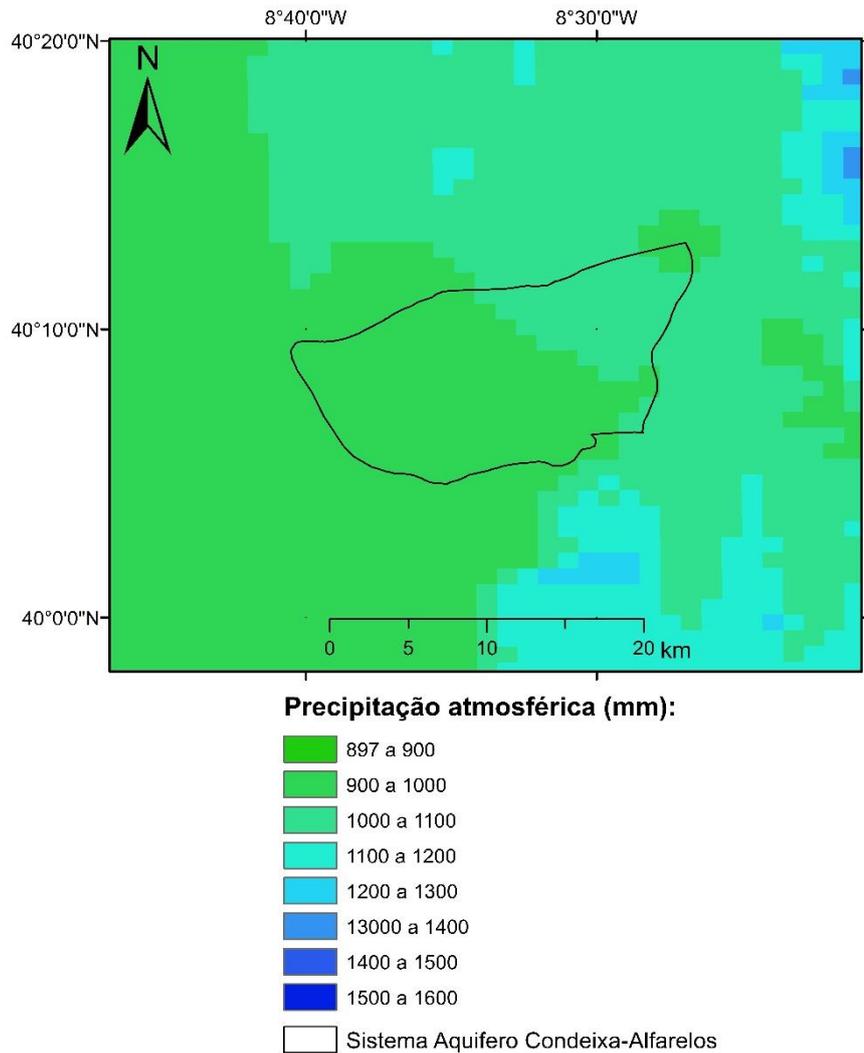


Figura 13 - Precipitação atmosférica anual média (mm). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).

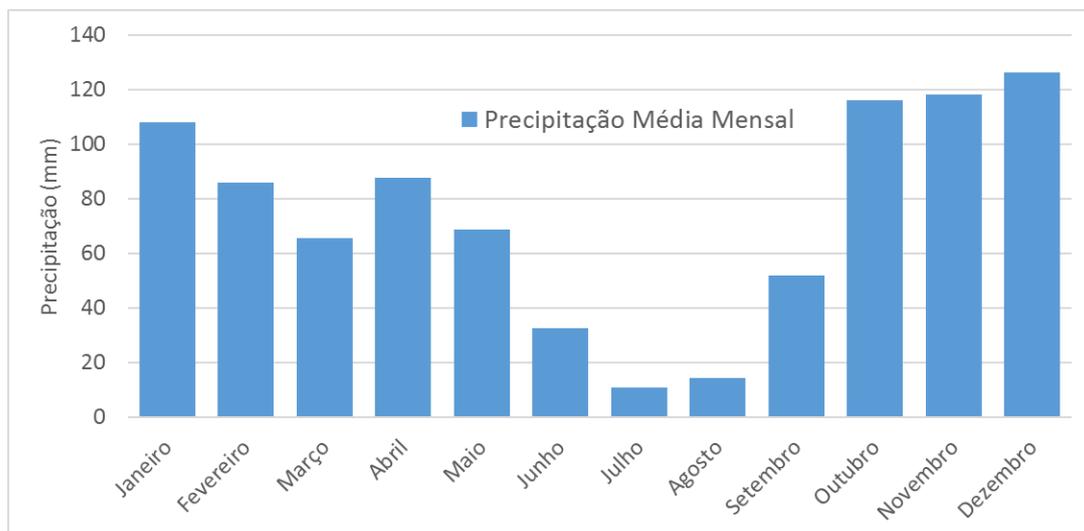


Figura 14 - Precipitação média mensal, normais climatológicas Coimbra (1981/2010) (IPMA, 2017).

### 3.3.3. Evapotranspiração real

Para a zona em estudo os valores médios anuais de evapotranspiração real variam entre os 500 e os 700 mm (Figura 15), segundo a informação disponibilizada no Atlas Digital do Ambiente (Evapotranspiração Real, quantidade de água devolvida à atmosfera, valores médios anuais, em mm) (SNIAmb, 2017).

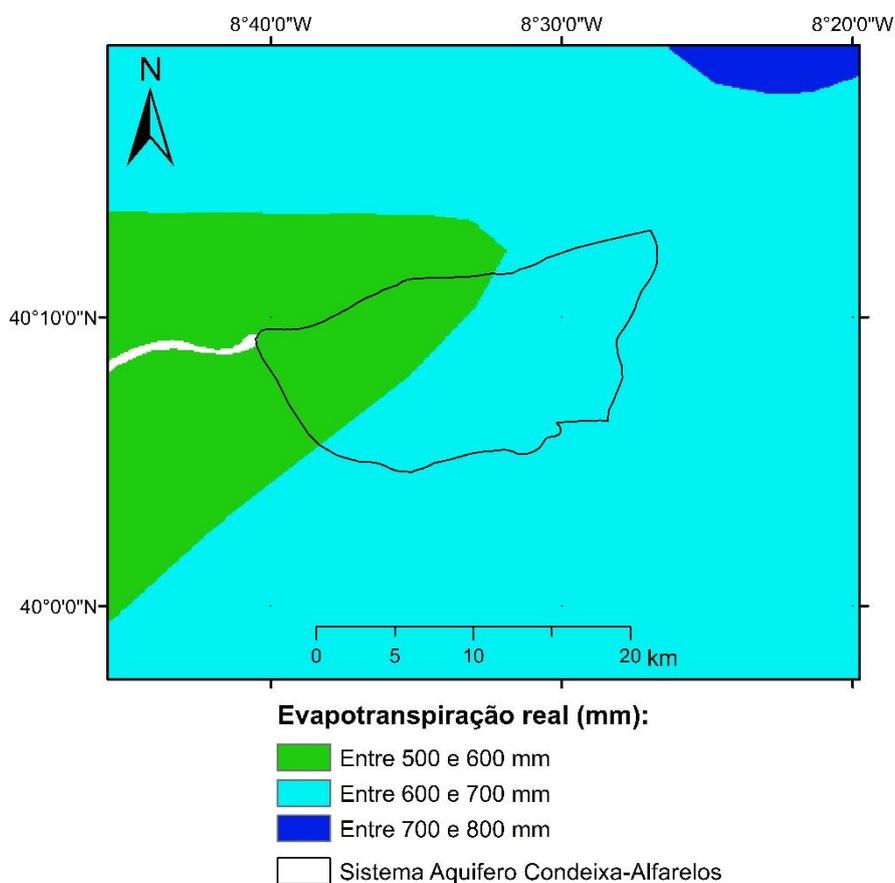


Figura 15 - Evapotranspiração real média anual (mm). Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).

### 3.3.4. Escoamento superficial

Os valores do escoamento superficial para a região de estudo variam entre os 400 e os 600 mm para um ano médio, aproximadamente. É ainda possível afirmar que podem ocorrer variações entre 500 e 600 mm, para um ano húmido e entre 200 e 300 mm para um ano seco (PGBH, 2012).

A Figura 16 apresenta a distribuição dos valores do escoamento superficial na área, calculada através da multiplicação dos coeficientes de escoamento, disponibilizados no Atlas da Água (coeficientes de escoamento para um período de retorno de 100 anos) pela precipitação. A Figura 17 apresenta a distribuição dos valores do escoamento médio anual a partir de dados do Atlas da Água (quantidade de água na rede de drenagem para cada bacia hidrográfica, em mm, segundo modelo Temez) (SNIAmb, 2017).

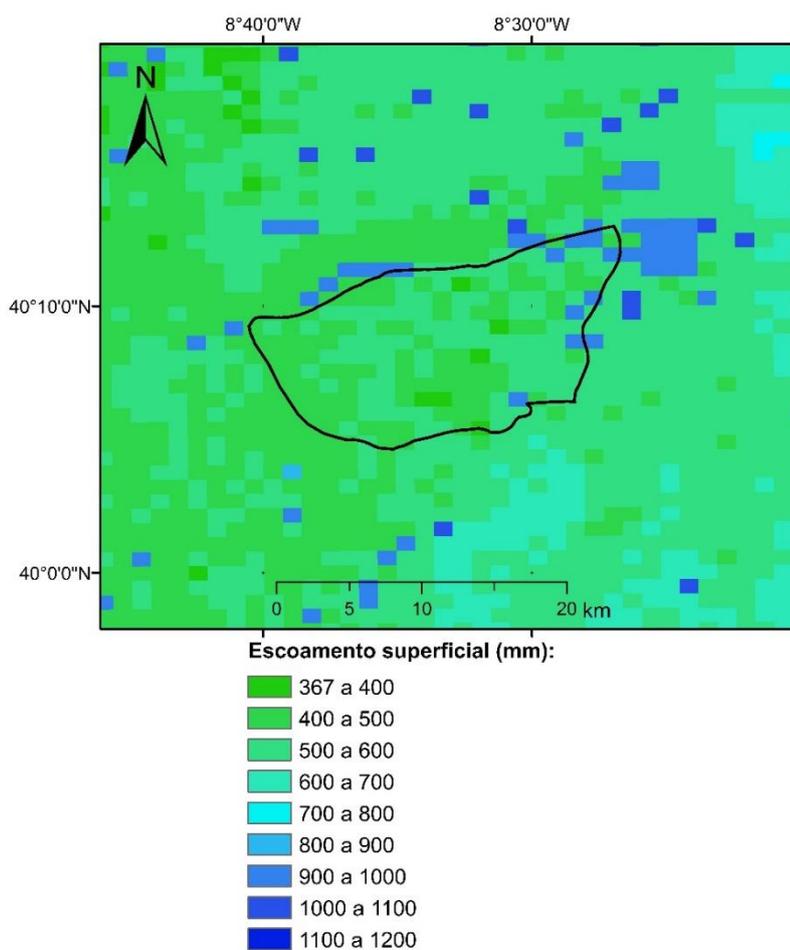


Figura 16 - Escoamento médio anual – precipitação x coeficiente de escoamento. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017).

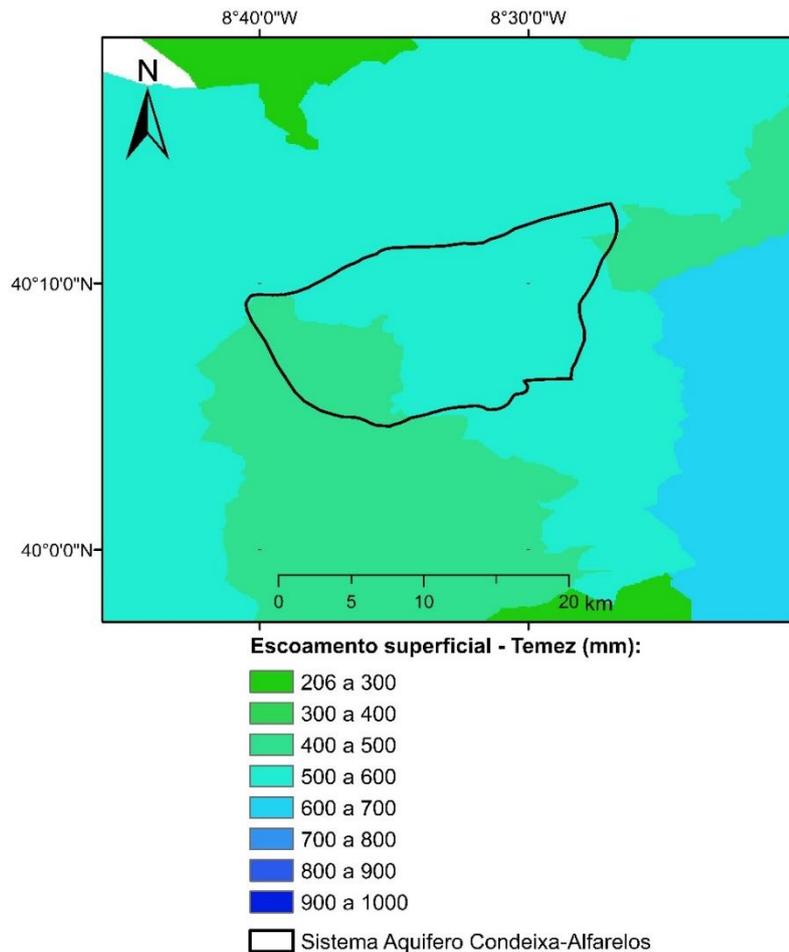


Figura 17 - Escoamento médio anual – modelo de Temez. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2017)

### 3.3.5. Classificação climática

A classificação de Köppen-Geiger (Köppen 1900; Geiger, 1954, 1961; citados em Kottek et al., 2006) é a classificação do clima mais utilizada e assume que o clima próprio de cada região é refletido no tipo de vegetação nela existente.

A classificação atribui a cada tipo de clima um código de três letras. A primeira letra indica o tipo de clima, baseado na vegetação, existindo 5 grupos de clima diferentes conforme a latitude, do equador aos polos: tropical ou megatérmico (A), seco ou árido (B), temperado ou mesotérmico (C), continental ou microtérmico (D) e glacial (E). A segunda letra da classificação (Tipo) é determinada pelo regime pluviométrico e, por fim, a terceira (Subtipo) considera a discriminação das estações pela temperatura do ar (Kottek et al., 2006).

A zona em estudo é então, segundo esta classificação, caracterizada por um clima do tipo Csb, o que corresponde a um clima temperado (C) com verões quentes e secos (Figura 18).

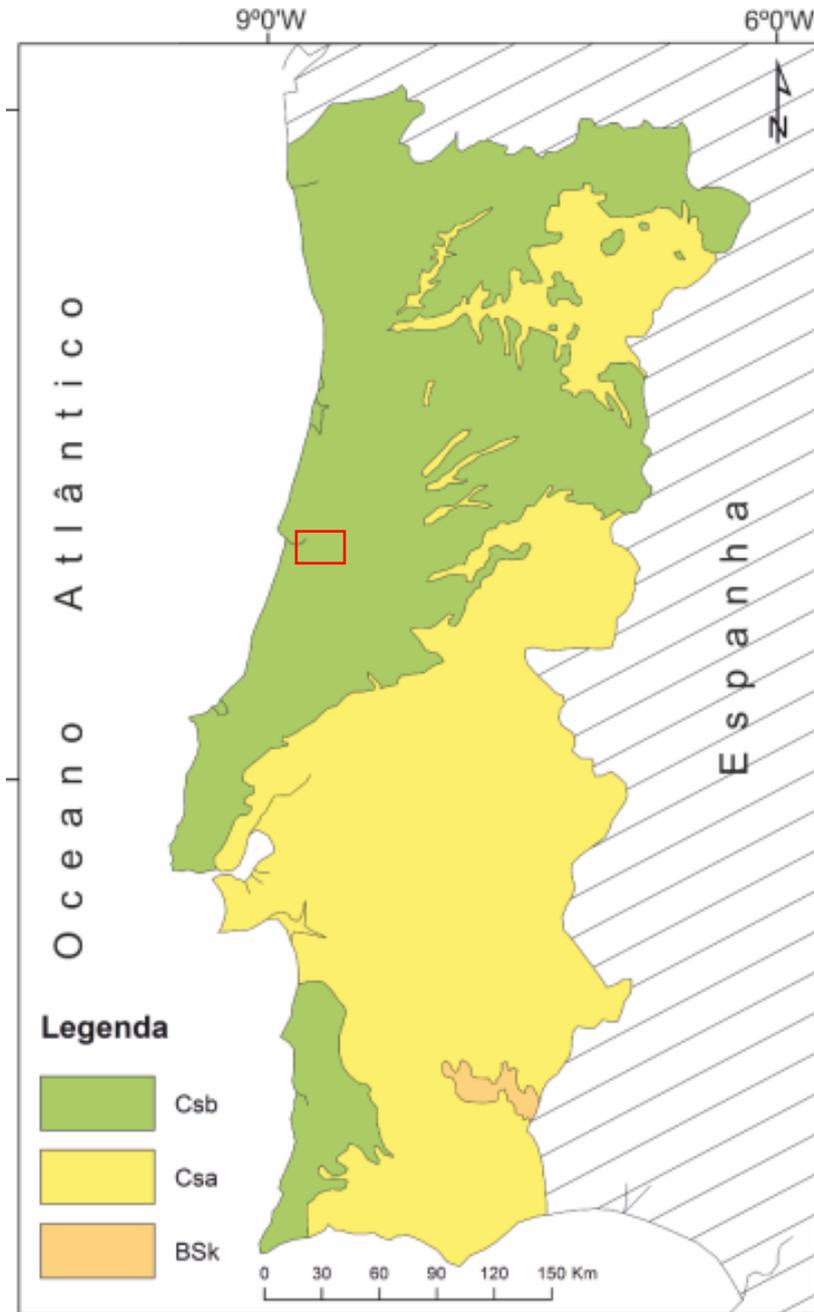


Figura 18 - Classificação climática Köppen-Geiger de Portugal Continental (adaptado de IPMA, 2017).

### 3.4. Hidrografia

A área de estudo enquadra-se na Região Hidrográfica 4 que compreende as Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Lis e Mondego. É precisamente nesta última bacia que se encontra o objeto deste estudo.

São diversas as linhas de água existentes nesta área, sendo as principais, de E para W, a Ribeira dos Covões, Ribeira de Frades/Antanho, Vala dos Moinhos, Rio Ega e Rio de Mouros e, por fim, Rio Arunca, sendo que as suas respetivas bacias estão delineadas a verde na mesma (Figura 19).

Todas estas linhas de água têm sentido de escoamento para N, em direção ao Rio Mondego.

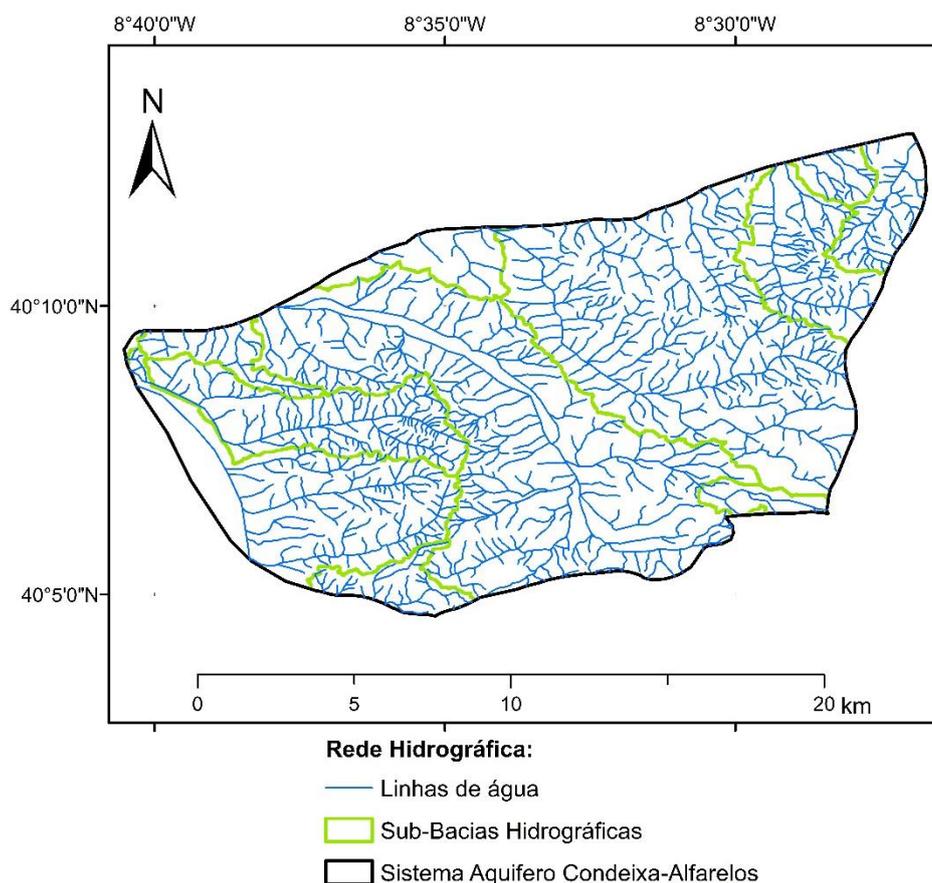


Figura 19 - Rede hidrográfica da área de estudo com a delimitação das sub-bacias englobadas. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de Costa, 2017; SNIAmb, 2017).

### 3.5. Enquadramento geológico

De um ponto de vista geológico a zona em estudo enquadra-se na Orla Mesocenozóica Ocidental Portuguesa. Esta unidade corresponde à Bacia Lusitânica<sup>1</sup> uma bacia sedimentar desenvolvida durante parte do Mesozoico cuja dinâmica se enquadra no contexto da fragmentação da Pangeia, mais especificamente da abertura do oceano Atlântico (Kullberg et al., 2013). Caracteriza-se como uma bacia distensiva e pertence a uma margem continental do tipo de rifte não vulcânica (Kullberg, et al., 2013).

A Bacia Lusitânica apresenta-se segundo uma direção NNW-SSE, aproximadamente, tendo um alongamento de cerca de 200 km segundo essa mesma direção e de cerca de 100 km na direção perpendicular, tendo dessa forma uma área aproximada de 20 000 km<sup>2</sup> (Kullberg, et al., 2013). Individualiza-se a Este do Maciço Antigo pela falha Porto-Tomar e a Oeste pelo *horst* da Berlenga (PGBH4, 2012; (Kullberg et al., 2013).

Na Figura 20 é apresentada a carta geológica da área de estudo.

As terminologias geológicas utilizadas estão de acordo com as existentes na Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50000, e nas notícias explicativas das folhas 19-C Figueira da Foz (Rocha et al., 1981) e 19-D Coimbra-Lousã (Soares et al., 2005), sendo que a terminologia escolhida para cada um dos casos foi a mais recente.

A geologia da área de estudo pode ser resumida através de uma breve descrição das unidades litostratigráficas ali existentes, da mais recente até à mais antiga.

---

<sup>1</sup>Dependendo dos autores pode aparecer ainda como Bacia Lusitana ou Bacia Lusitaniana.

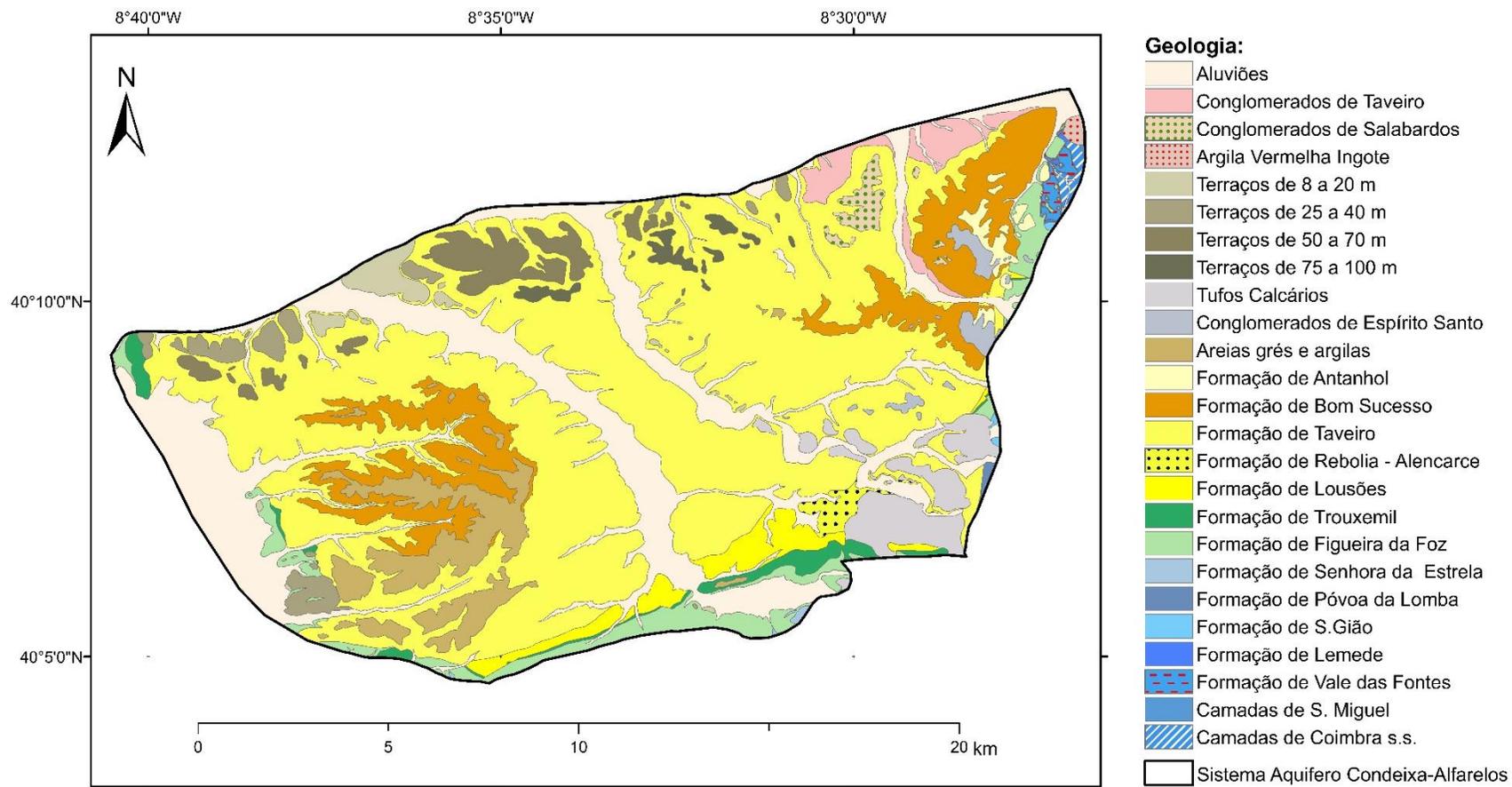


Figura 20 - Carta Geológica da área de estudo. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de Costa, 2017; Folhas 19-C e 19-D da Carta Geológica de Portugal).

A área encontra-se, na sua maioria, coberta por materiais de idade cretácica, embora aflorem unidades do Paleogénico, Miocénico, Pliocénico, Pleistocénico e Holocénico, e ainda algumas do Jurássico.

Temos assim, a seguinte sequência:

### **Holocénico**

**Aluviões (a)** – unidade com espessura variável. São bastante desenvolvidos ao longo do rio Mondego e também ao longo dos principais vales afluentes das suas margens. Constituídos essencialmente, do topo para a base, por uma camada de terra vegetal seguida de areia lodosa, fina a grosseira, amarela a acastanhada; lodo castanho passando a cinzento, com areia fina e conchas; areia fina a média, lodosa, cinzenta, às vezes acastanhada a amarelada, com conchas, com restos de areão e madeira incarbonizada na base, lodo cinzento com conchas, tornando-se amarelado e com areia grosseira na parte superior e, por fim, areia de grão médio a grosseiro, amarelada, com conchas e areão. (Rocha *et al*, 1981).

### **Pleistocénico**

**Terraços (Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub> e Q<sub>4</sub>)** – Espessura de 12-25 m. Representados por areias e cascalheiras (Rocha *et al*, 1981). Intercalações de níveis de areias grosseiras e cascalheiras com seixos bem rolados, com níveis de arenitos argilosos castanhos amarelados com alguns seixos, níveis de areias argilosas consolidadas, grosseiras, acastanhadas com seixos dispersos e ainda com pequenos níveis de argila cinzenta (Rocha *et al*, 1981).

**Tufos Calcários (Q<sub>t</sub>)** – Espessura não definida. Tufos calcários em bancadas. Os níveis inferiores são constituídos por calcários pulverulentos, ao passo que as camadas superiores são bastante compactas e constituem um travertino (Rocha *et al*, 1981).

**Conglomerados de Espírito Santo (Q<sub>ES</sub>)** – Espessura não definida.

### **Pliocénico**

**Areias, Grés e Argilas (P)** – Espessura não definida. Complexo de areias, às vezes finas amareladas, com estratificação entrecruzada, com seixos, de grés argilosos e de argilas (Rocha *et al*, 1981).

**Formação de Antanol (P<sub>An</sub>)** – Espessura de 10-12 m. Conglomerado grosseiro com calhaus redondos sob um corpo subarcosarenítico, micáceo, amarelado, sendo este último seguido de um corpo argilo-pelítico negro a acinzentado e por fim um corpo subarcosarenítico grosseiro, algo levemente micáceo com calhaus e seixos raros e com cor amarelada e/ou acastanhada (Rocha *et al*, 1981).

### **Terciário**

**Formação de Bom Sucesso (E<sub>Bs</sub>)** – Espessura máxima de 80±10 m. Essencialmente arcossarenítica e subarcossarenítica muito grosseira, imatura, esbranquiçada a esverdeada, localmente acastanhada e/ou avermelhada e em corpos métricos com estrutura interna oblíqua de ângulo elevado (Soares *et al*, 2007).

### **Cretácico**

**Formação de Taveiro (C<sup>2</sup><sub>Ta</sub>)** – Espessura máxima de 170-200 m. É composta por uma sucessão de estratos métricos de pelitos vermelhos, acastanhados ou rosados, laminados e bioturbados. Insterstratificam com outros essencialmente arcossareníticos grosseiros, com seixos e calhaus dispersos, submaturos a imaturos, esbranquiçados a rosados com estruturas entrecruzadas. Na base estes níveis tendem a ser grosseiros a muito grosseiros, por vezes conglomeráticos (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Rebolia-Alencarce (C<sup>2</sup><sub>RA</sub>)** – Espessura de 50-60 m. Articulações de corpos subarcossareníticos a quartzareníticos, de granulometria grosseira, submaturos a imaturos, com estruturas oblíquas e em ventre, localmente ricos em seixos e calhaus de quartzo e quartzito e cores esbranquiçadas a rosadas, por vezes avermelhadas. São frequentes corpos circunscritos de lutitos cinzentos e/ou amarelados, por vezes com crostas férricas (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Lousões (C<sup>2</sup><sub>Ls</sub>)** – Espessura de 10-20 m. Na base trata-se de um arenito fino a muito fino de cor amarelada e/ou acinzentada (sendo que, localmente para a base há pequenos corpos circunscritos de pelitos cinzentos com fragmentos carbonosos) passando para o topo a quartzarenito e/ou subarcossarenítico grosseiro a muito grosseiro de cor acastanhada e/ou avermelhada (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Trouxemil (C<sup>2</sup><sub>Tr</sub>)** – Espessura de 10-40m. Formação essencialmente margolútica e/ou areno-margosa acinzentada (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Figueira da Foz (C<sup>1-2</sup><sub>FF</sub>)** – Espessura de 10-120 m. Corpo detrítico, arcossarenito a quartzarenito, imaturo a submaturo, esbranquiçado a cinzento, com manchas de oxidação amareladas, avermelhadas ou violáceas e com estrutura interna entrecruzada curvilínea. Presença de corpos discretos de arenitos finos a médios e/ou lutitos maciços ou laminados, por vezes micáceos e localmente ricos em restos carbonosos e fósseis vegetais. Conglomerados de tendência oligomítica em quartzo e quartzito mais frequentes para a base (Soares *et al*, 2007).

## **Jurássico**

**Formação da Senhora da Estrela (J<sup>2</sup><sub>SE</sub>)** – Espessura de cerca de 120 m. Constituída principalmente por calcários micríticos e biodetríticos esbranquiçados (localmente em barras decamétricas) e amarelados (Soares *et al*, 2007).

**Formação da Póvoa da Lomba (J<sup>2</sup><sub>PL</sub>)** – Espessura de 40±5 m. Compreende essencialmente, na base calcários margosos azulados e fossilíferos que insterstratificam para a parte superior com calcários biosparríticos também fossilíferos, esbranquiçados a acinzentados (Soares *et al*, 2007).

**Formação da S. Gião (J<sup>1</sup><sub>SG</sub>)** – Espessura total de cerca de 145 m. Unidade de natureza essencialmente margo-calcária (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Lemele (J<sup>1</sup><sub>LE</sub>)** – Espessura de 15±2 m. Constituída essencialmente por bancadas de calcário micrítico e calcário margoso, por vezes a ultrapassar o metro e de cor acinzentada a amarelada, separadas por níveis margosos, geralmente cinzentos, com pouco centímetros de espessura (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Vale das Fontes (J<sup>1</sup><sub>VF</sub>)** – Espessura de 40±10 m. Constituída essencialmente por margas, por vezes grumosas, de cor cinzenta escura, localmente acastanhadas, alternando com bancadas de calcário de cor predominantemente cinzenta (Soares *et al*, 2007).

**Formação de Coimbra = Camadas de Coimbra (J<sup>1</sup><sub>Co</sub>) + Camadas de S. Miguel (J<sup>1</sup><sub>Co'</sub>)** – Espessura ronda os 100±30 m. De baixo para cima integra: Dolomitos e calcários dolomíticos (J<sup>1</sup><sub>Co</sub>) = Camadas de Coimbra; e calcários e calcários dolomíticos (J<sup>1</sup><sub>Co'</sub>) = Camadas de S. Miguel.

### 3.6. Caracterização do solo

#### 3.6.1. Tipo de solo

A área estudada é caracterizada pela predominância de podzóis órticos (figura 20). Existem ainda zonas com solos do tipo fluviolosos éutricos, nomeadamente juntos das principais linhas de água, e do tipo luviolosos rodocrômicos cálcicos no extremo S da área e do tipo cambissolos cálcicos, no extremo E da mesma (Figura 21).

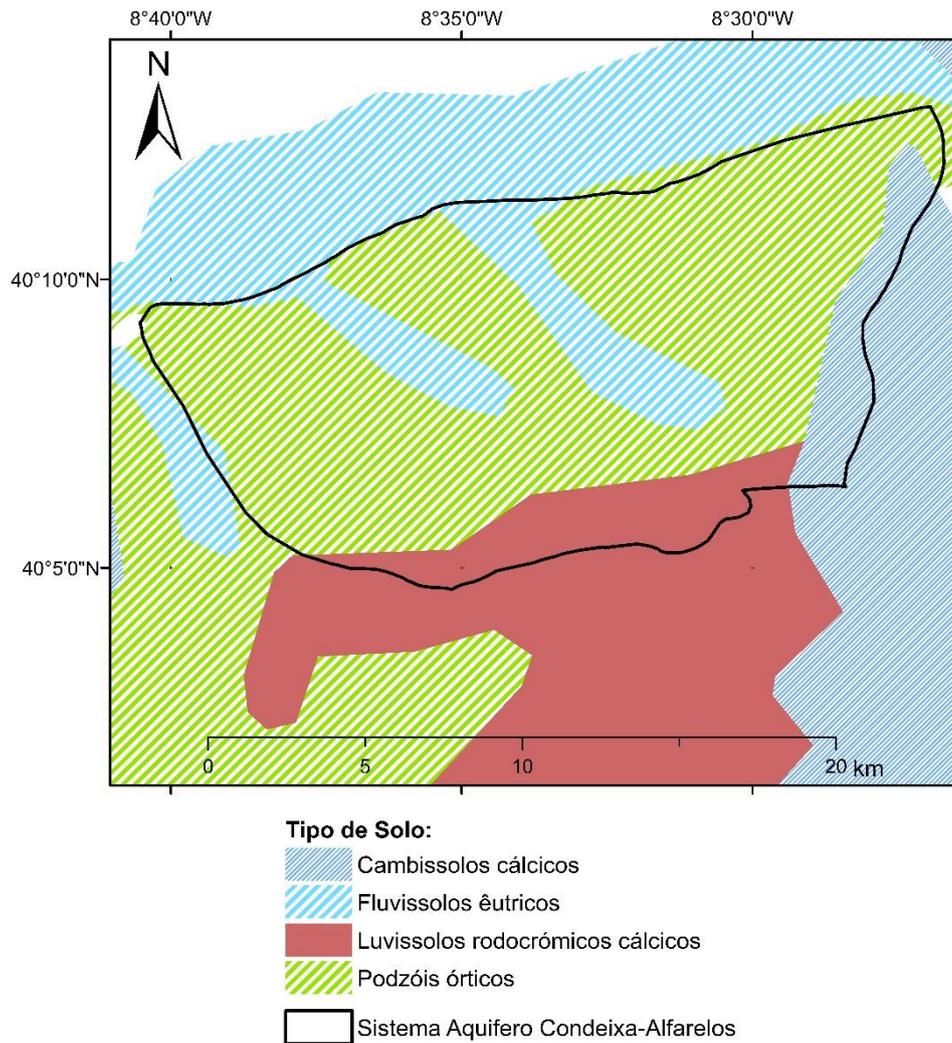


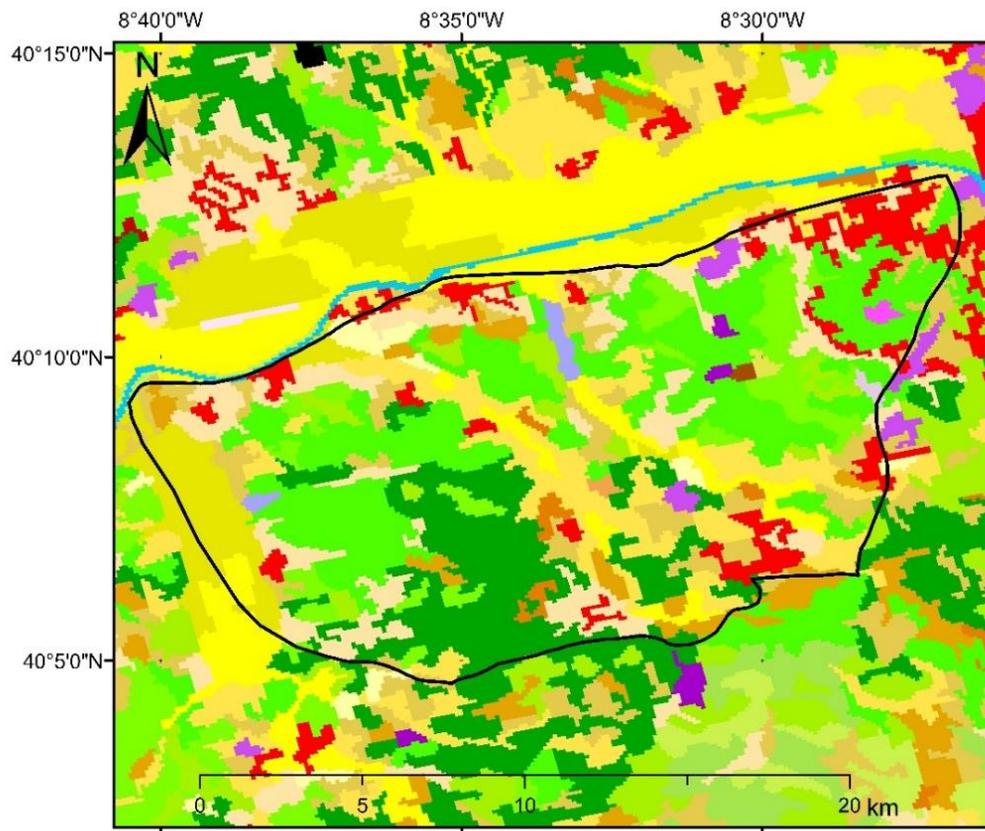
Figura 21 - Tipo de solos. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2018).

### **3.6.2. Uso e ocupação do solo**

Em relação ao uso e ocupação do solo (Figura 22) é possível concluir que a zona em estudo apresenta uma clara predominância de área de ocupação florestal, sendo esta seguida de ocupação agrícola, de ocupação urbana, de ocupação industrial, de extração de inertes e por fim, de uma pequena área de pauis.

De acordo com esta mesma classificação, a ocupação florestal compreende florestas de folhosas, florestas mistas, florestas de resinosas e florestas abertas, cortes e novas plantações.

Da mesma forma, a ocupação agrícola inclui culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes, agricultura com espaços naturais e seminaturais, sistemas culturais e parcelares complexos, culturas temporárias de regadio, culturas temporárias de sequeiro, vinhas, olivais e pomares.



**Uso e Ocupação do Solo (CLC, 2012):**

- 111 - Tecido urbano contínuo
- 112 - Tecido Urbano Descontínuo
- 121 - Indústria, comércio e equipamentos gerais
- 122 - Redes viárias e ferroviárias e espaços associados
- 123 - Áreas portuárias
- 124 - Aeroportos e aeródromos
- 131 - Áreas de extração de inertes
- 132 - Áreas de deposição de resíduos
- 133 - Áreas de construção
- 141 - Espaços verdes urbanos
- 142 - Equipamentos desportivos
- 211 - Culturas temporárias de sequeiro
- 212 - Culturas temporárias de regadio
- 213 - Arrozais
- 221 - Vinhas
- 222 Pomares
- 223 - Olivais
- 231 - Pastagens permanentes
- 241 - Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes
- 242 - Sistemas culturais e parcelares complexos
- 243 - Agricultura com espaços naturais e semi-naturais
- 244 - Sistemas agro-florestais
- 311 - Florestas de folhosas
- 312 - Florestas de resinosas
- 313 - Florestas mistas
- 321 - Vegetação herbácea natural
- 322 - Matos
- 323 - Vegetação esclerófila
- 324 - Florestas abertas, cortes e novas plantações
- 331 - Praias, dunas e areais
- 332 - Rocha nua
- 333 - Vegetação esparsa
- 334 - Áreas ardidas
- 335 - Neves eternas e glaciares
- 411 - Paúis
- 412 - Turfeiras
- 421 - Sapais
- 422 - Salinas e aquicultura litoral
- 423 - Zonas entre marés
- 511 - Cursos de água
- 512 - Planos de água
- 521 - Lagoas costeiras
- 522 - Desembocaduras fluviais
- 523 - Oceano
- Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos

Figura 22 - Uso e ocupação do solo Criado no software ArcGIS (CLC, 2012)

### 3.7. Hidrogeologia regional

A zona em estudo integra a Unidade Hidrogeológica denominada por Orla Ocidental e fica dentro dos limites do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31) (Figura 23).

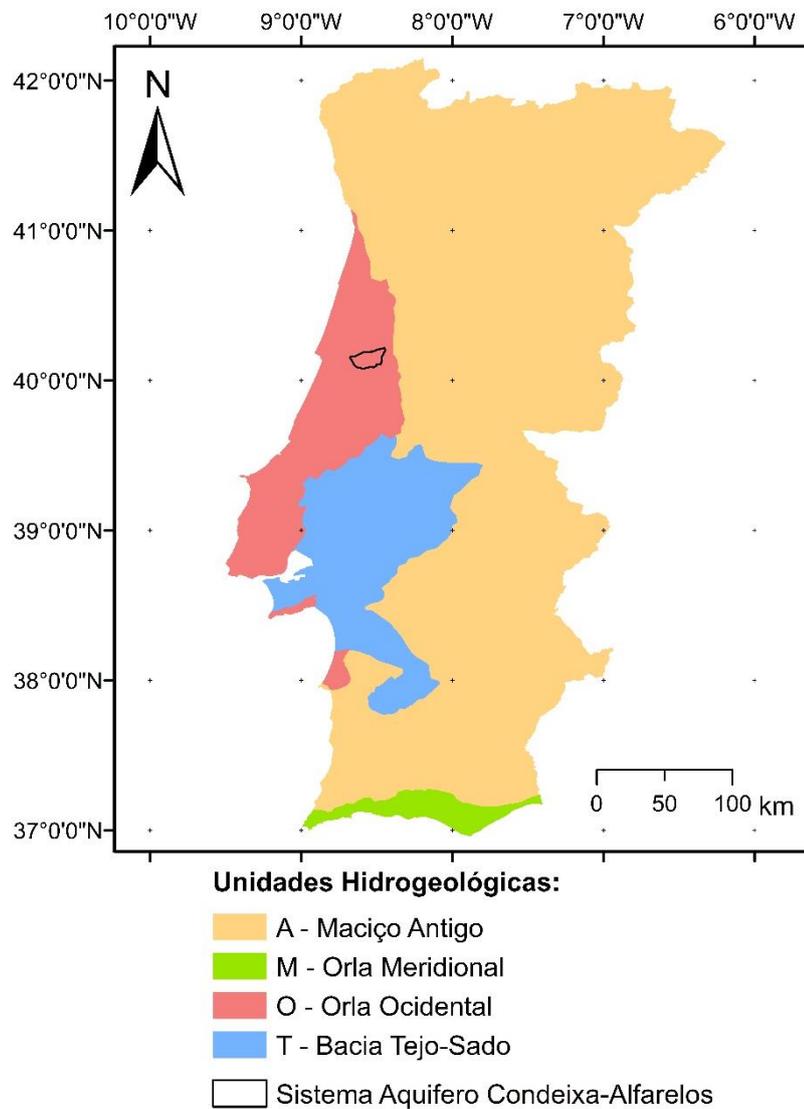


Figura 23 - Enquadramento do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos nas Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental. Criado no software ArcGIS 10.2.2 (adaptado de SNIAmb, 2018).

Segundo Peixinho de Cristo, 1998, o Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos é caracterizado como sendo essencialmente poroso, multicamada constituído por três formações aquíferas produtivas: Arenitos Finos de Lousões (Formação de Lousões), Calcários Apinhoados de Costa de Arnes (Formação de Trouxemil) e Arenitos de Carrascal (Formação de Figueira da Foz) (adaptado de PGBH4, 2012). Na Figura 24 está representada a extensão dos afloramentos dessas mesmas unidades na área de estudo, que constituem a área de recarga direta do sistema aquífero em estudo, com uma área de cerca de 14 km<sup>2</sup>.

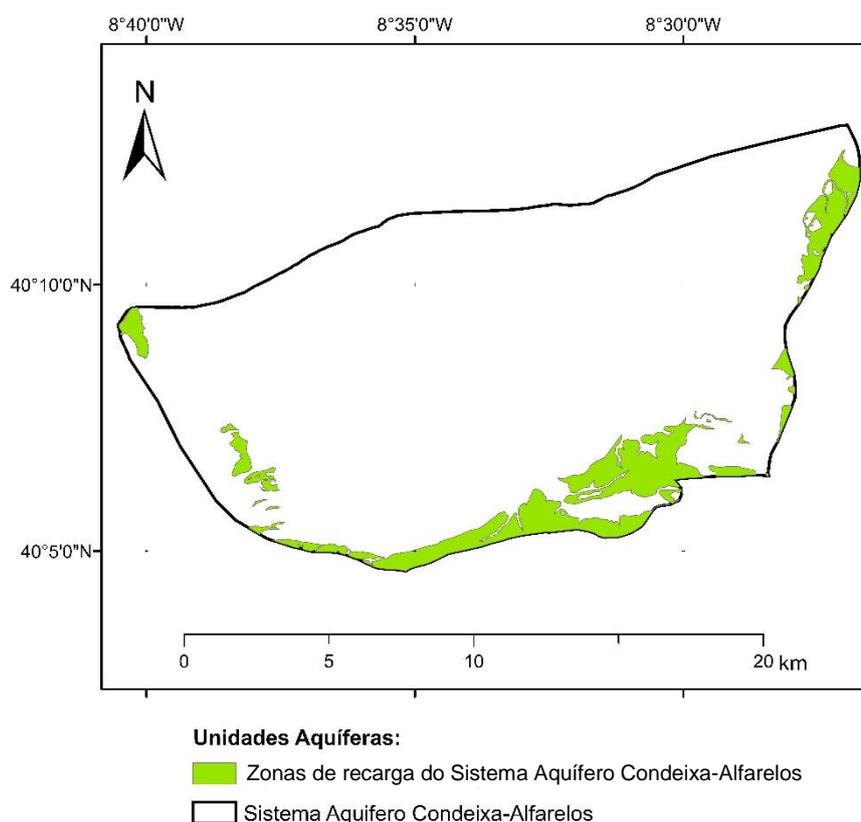


Figura 24 - Área de recarga das unidades aquíferas constituintes do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos. Criado no software ArcGIS 10.2.2. (adaptado de PGBH4, 2002).

Estas formações encontram-se subjacentes à Formação de Taveiro, uma formação que apresenta um comportamento do tipo aquitardo/aquicludo, que confina os níveis aquíferos inferiores que são os níveis produtivos do sistema aquífero Condeixa-Alfarelos.

Além destas três unidades aquíferas referidas, Costa (2017) apontou ainda uma quarta eventual unidade produtiva, que pode integrar este sistema aquífero, implantada

na Formação Rebolia-Alencarce (limitada superiormente pela formação de Taveiro e inferiormente pela Formação de Lousões) (Figura 25).

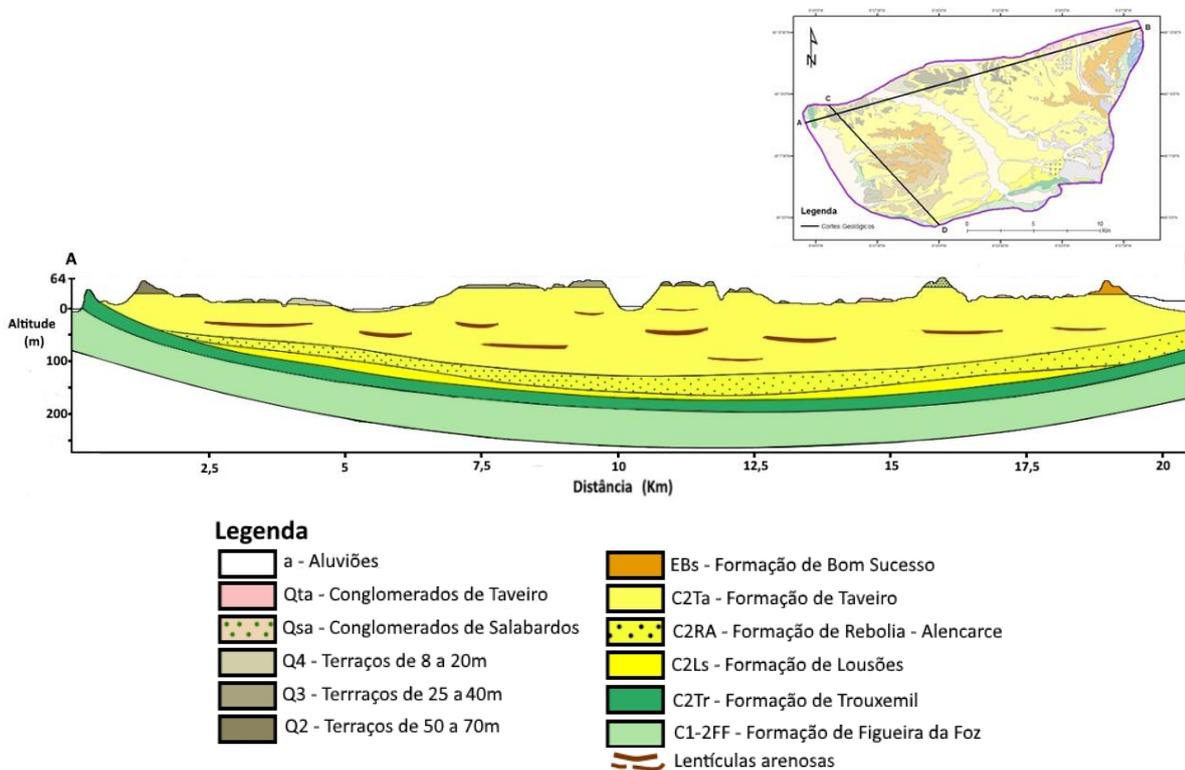


Figura 25 - Corte hidrogeológico Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (Costa, 2017).

No que diz respeito à qualidade físico-química da água, foram utilizadas cinco análises, por Almeida et al. (2000) e foi apresentada a distribuição da mineralização.

Tabela 2 - Análises obtidas em cinco captações do sistema aquífero (adaptado de Almeida et al., 2000).

Profundidade (m)	330	100	200	218	117
Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	889	5920	5900	289	550
pH	8	7,5	7,2	6,5	7,0
Bicarbonato (mg/L)	217,2	201,3	237,8	73,8	390,4
Cloreto (mg/L)	145,6	1864	1740	56,80	28,4
Sulfato (mg/L)	57,6	228,8	184,8	3,3	7,8
Nitrato (mg/L)	1,2	-	-	3,4	0,3
Sódio (mg/L)	108,6	747,5	894	27	21
Potássio (mg/L)	6,7	-	-	-	-
Cálcio (mg/L)	59	333	181,6	181,6	128,4
Magnésio (mg/L)	16,5	126	106,3	106,3	0,5
Ferro (mg/L)	0,1	-	-	0,3	0,2

Como é possível observar na Tabela 2, existem dois pontos para os quais os valores de condutividade quer os valores de mineralizações, por exemplo, de cloreto e sódio são bastante superiores aos dos outros pontos. Este facto é associado por Almeida et al., (2000) à dissolução de material evaporítico e aos fenómenos de diapirismo relacionados ao diapiro de Soure.

Segundo Almeida *et al.* (2000) a recarga, nesta área, é feita pela precipitação que cai diretamente sobre as superfícies dos afloramentos permeáveis. Existe uma estimativa de 150 mm anuais de recarga direta pela precipitação, efetuada por Almeida *et al.* (2000). Segundo o mesmo autor, as unidades mais permeáveis dos Arenitos e Argilas de Taveiro têm nível piezométrico mais elevado do que as camadas das unidades do Cretácico inferior, sendo possível que o aquífero possa receber recarga por drenância vertical, a partir destas unidades sobrejacentes, sendo, no entanto, difícil de quantificar.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Aquíferos suspensos e aquíferos não confinados superiores

No decorrer do presente trabalho, foi considerada importante ainda a caracterização das unidades aquíferas que existem sobre os Arenitos e Argilas de Taveiro, e que constituem aqui a unidade dos  aquíferos suspensos e aquíferos não confinados superiores, instalados em depósitos do Cenozóico.

Na Figura 26 está representada a extensão dos afloramentos dessas mesmas unidades, correspondente à zona de recarga direta dos mesmos, com uma área de cerca de 82 km<sup>2</sup>.

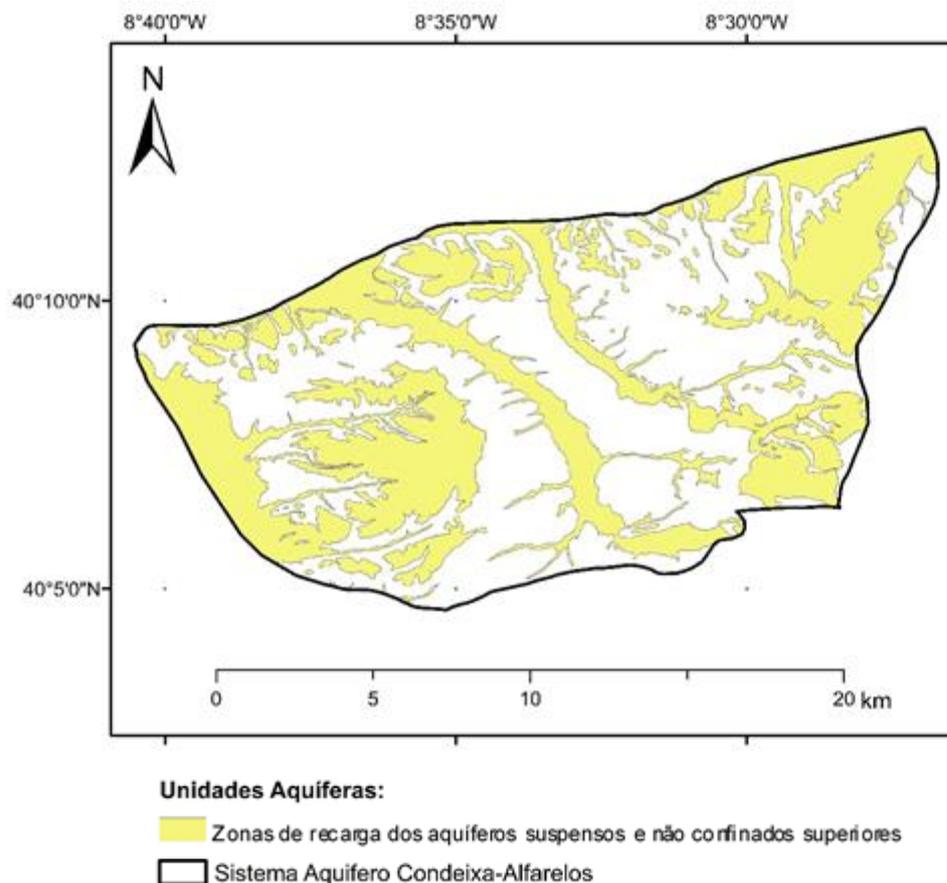


Figura 26 - Área de recarga das unidades aquíferas suspensas e não confinadas superiores. Criado no software ArcGIS 10.2.2.

Estes aquíferos foram estudados, de uma forma bastante simples e sucinta através de um reconhecimento e caracterização *in situ* de pontos de água efetuada em junho de 2017, através da medição de parâmetros físico-químicos em amostras colhidas durante as atividades de campo (Figura 27), nomeadamente os valores de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH e, em alguns casos, a profundidade da água de forma a ser possível calcular o nível freático. Os resultados dessas medições são apresentados na Tabela 3.

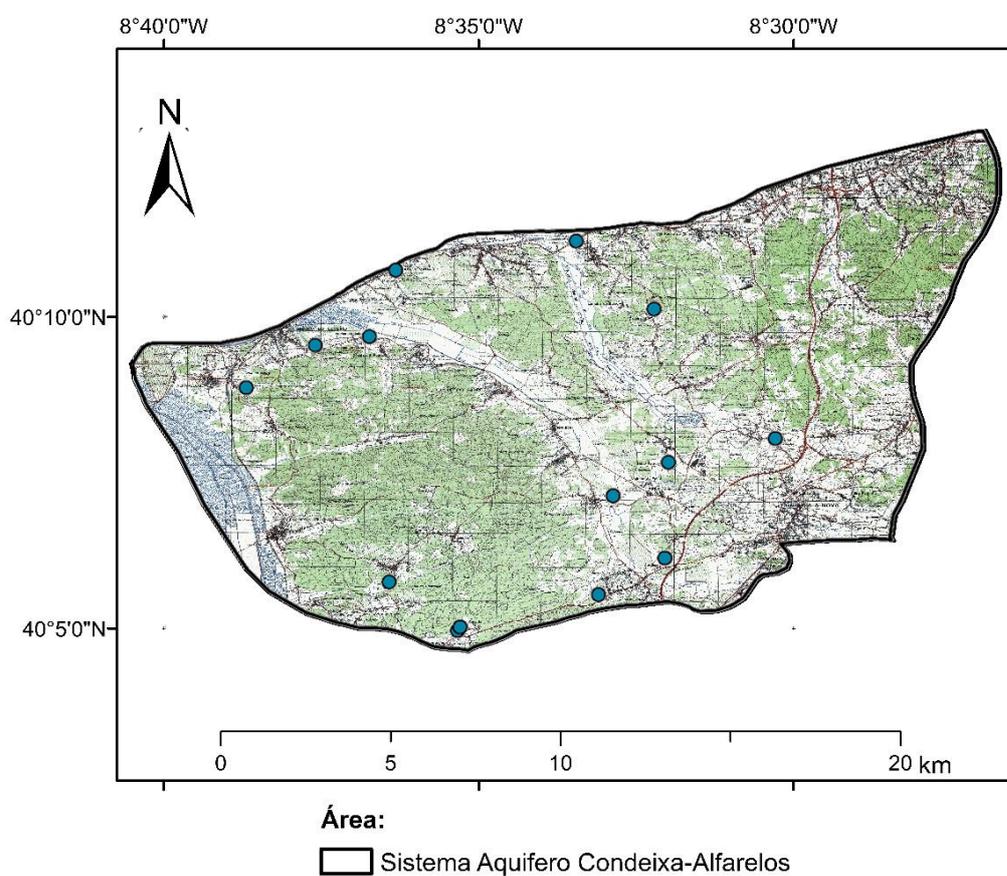


Figura 27 - Localização dos pontos de água (círculos azuis) onde foram realizadas medições dos parâmetros físico-químicos, em junho de 2017.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos medidos *in situ*.

Descrição do ponto de água	T (°C)	CE (mS/cm)	pH	Profundidade (m)	Cota do terreno	Nível freático (m)
Poço - Cruzamento para Arzila	19,1	420	6,7	1,48	8	6,52
Linha de água ao lado do ponto nº 1	20,1	610	6,46	-	8	-
Poço - Caneira	18,3	274	7,2	2,71	65	62,29
Poço - Sebal	20,1	1506	6,9	3,63	38	34,37
Poço - Corteses	17	971	6,83	1,76	27	25,24
Poço - Pouca Pena	17,6	857	6,61	1,37	44	42,63
Poço - Campizes	21	706	7,33	1,82	16	14,18
Nascente - Painça	17,7	439	7,5	-	14	-
Poço - Gabrielos	21,1	518	7,09	-	13	-
Poço - Aluviões do Mondego	17,5	820	7,25	2,26	14	11,74
Linha de água - Ribeira de Pão Quente	21,3	718	7,64	-	35	-
Poço- Saída de Ega (sentido Ega-Soure)	22,8	493	7,2	2,4	40	37,6
Poço - Cavaleiros	19,9	815	7,15	1,05	50	48,95
Poço - Cavaleiros	19,7	797	7,05	2,34	45	42,66
Fonte - Fontes dos Cães	22,9	422	6,45	-	-	-

## 4.2. Estimação da recarga aquífera

### 4.2.1. Método da Flutuações do Nível Freático para estimação da recarga em aquíferos não confinados

Na área de estudo não existe nenhuma estação de monitorização de piezometria colocada num aquífero livre instalado nas unidades aquíferas sobrejacentes à formação de Arenitos e Argilas de Taveiro. Assim para a análise da recarga direta destas unidades decidiu-se utilizar dados de uma estação localizada numa zona próxima com características semelhantes às da área de estudo. Como foi referido no capítulo 1, a utilização de estimativas de recarga para zonas com características semelhantes às que estão a ser estudadas, pode ser de extrema importância num estudo de recarga.

Assim foi utilizada a estação A com o código 262/2 (SNIRH, 2017), situada em Redinha (Pombal), a sul da área de estudo, instalada no Sistema Aquífero O29 – Lourçal, sobre um aquífero não confinado, constituído por areias e seixos bem rolados do Plio-Pistocénico (Figura 28).

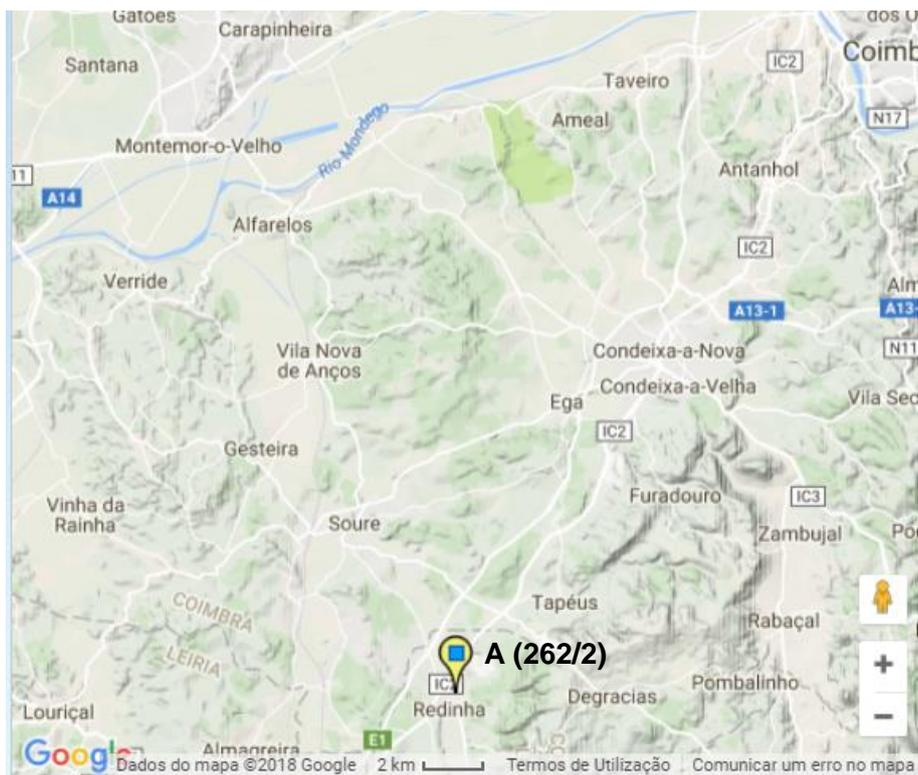


Figura 28 - Localização da estação de monitorização, da Rede de Piezometria, utilizada para os cálculos do método das flutuações do nível piezométrico. Imagem retirada de SNIRH (2017).

Tabela 4 - Valores do nível freático na estação A para o ano hidrológico 2016/2017 (SNIRH, 2017)

	A
Data	Nível piezométrico (m)
out_16	41,48
nov_16	
dez_16	
jan_17	42,2
fev_17	42,22
mar_17	42,25
abr_17	
mai_17	42,21
jun_17	42,21
jul_17	42,17
ago_17	42,11
set_17	42,08

Foi então utilizada a equação, apresentada no capítulo 1.

$$R = \Delta h \times S_y$$

O valor de  $\Delta h$  foi calculado através dos valores do nível freático na estação A, apresentados na Tabela 4.

Tendo estes valores, foram feitas as suas projeções graficamente (Figura 29).

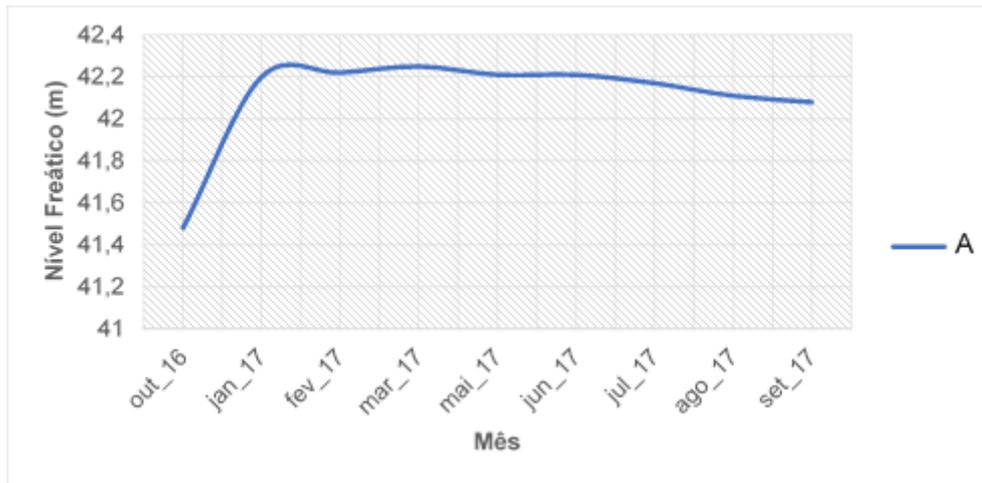


Figura 29 - Variação do nível freático (m) na estação de monitorização A ao longo do ano hidrológico 2016/2017.

Uma vez que o valor máximo do nível freático foi de 42,25 m e o mínimo de 41,48 então:

$$\Delta h = 42,25 - 41,48$$

$$\Delta h = 0,77m$$

No caso do valor de  $S_y$ , tendo em conta as características da composição do aquífero foi-lhe atribuído um valor médio de 0,20 a 0,25 considerando depósitos de areias grosseiras e cascalheiras com seixos bem rolados, com níveis de arenitos argilosos, segundo a classificação de Morris e Johnson (1967); citado em Batu (1998).

Para os valores de  $\Delta h$  e de  $S_y$ , obteve-se:

$$R = \Delta h \times S_y$$

$$R = 0,77 \times (0,20 \text{ a } 0,25)$$

$$R = 0,15 \text{ a } 0,19 \text{ m}$$

$$R = 150 \text{ a } 190 \text{ mm}$$



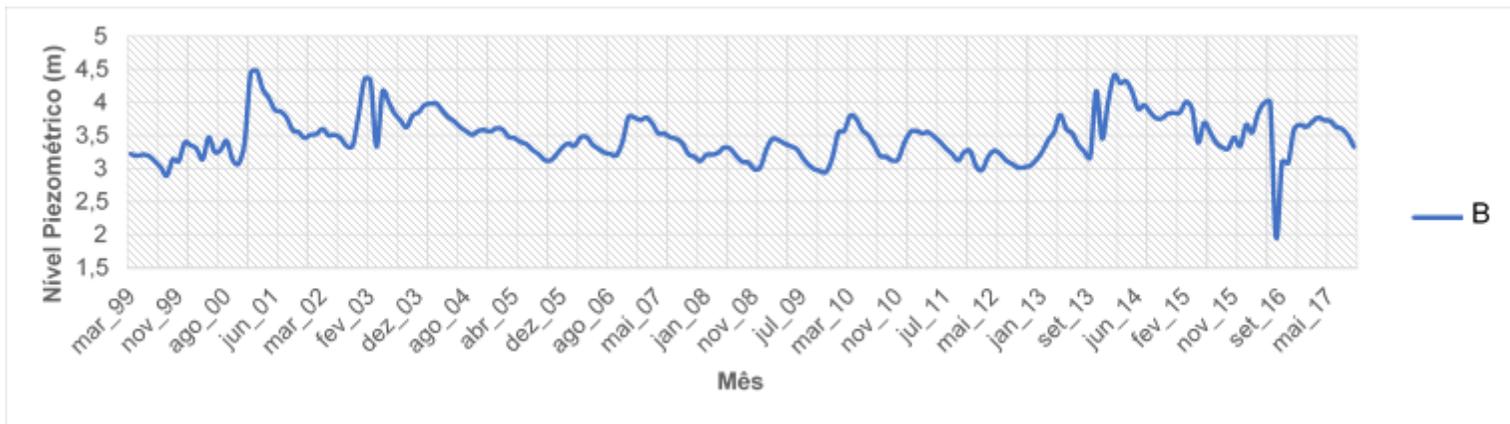


Figura 31 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização B entre 1999 e 2017 com representação gráfica de  $\Delta h$ .

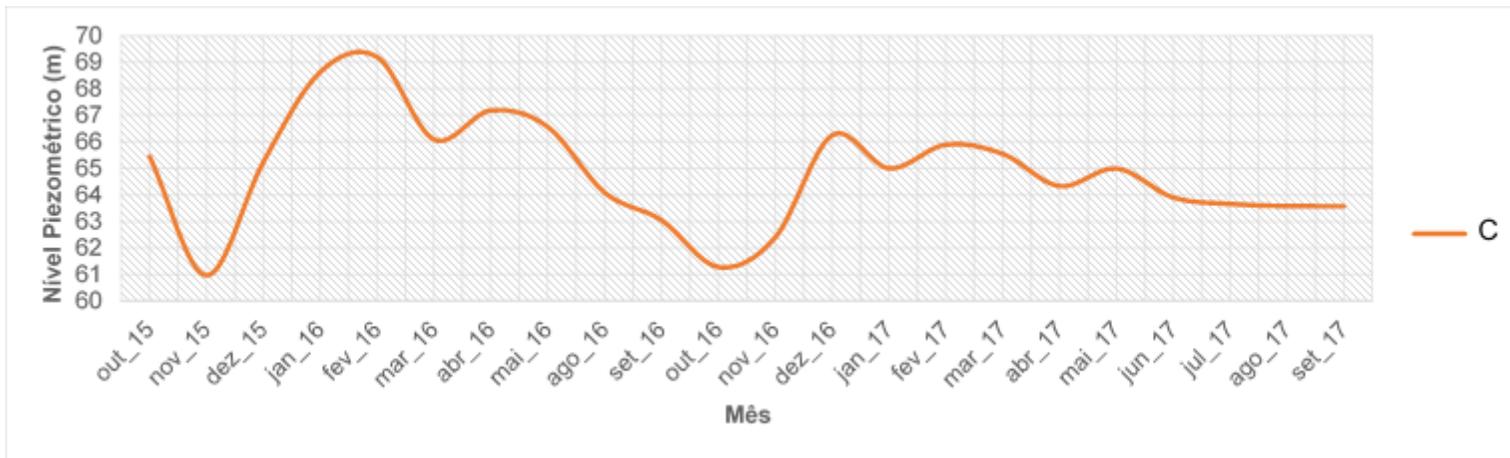


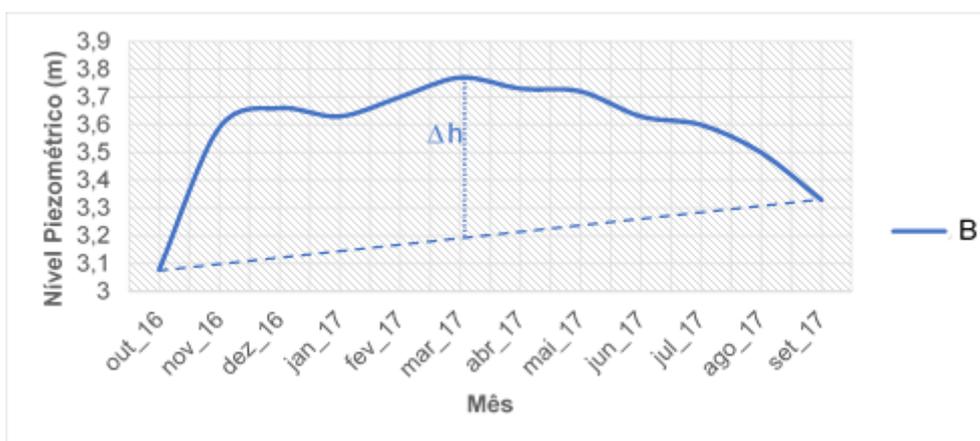
Figura 32 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização C entre 2015 e 2017 com representação gráfica de  $\Delta h$ .

Posteriormente, isolaram-se os valores correspondentes ao ano hidrológico de 2016/2017 ( *Tabela 5*).

*Tabela 5 - Valores do nível piezométrico nas Estações B e C para o ano hidrológico 2016/2017. (SNIRH, 2017)*

	B	C
Data	Nível piezométrico (m)	Nível piezométrico (m)
out_16	3,08	62,4
nov_16	3,59	66,25
dez_16	3,66	
jan_17	3,63	65
fev_17	3,7	65,9
mar_17	3,77	65,55
abr_17	3,73	64,33
mai_17	3,72	65
jun_17	3,63	63,9
jul_17	3,6	63,66
ago_17	3,5	63,58
set_17	3,33	63,57

Tendo estes valores, foram feitas as suas projeções a partir das quais foi possível encontrar um valor aproximado de  $\Delta h$ . As projeções dos valores da estação B e da estação C encontram-se na Figura 33 e Figura 34, respetivamente.



*Figura 33 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização B ao longo do ano hidrológico 2016/2017 com representação gráfica de  $\Delta h$ .*

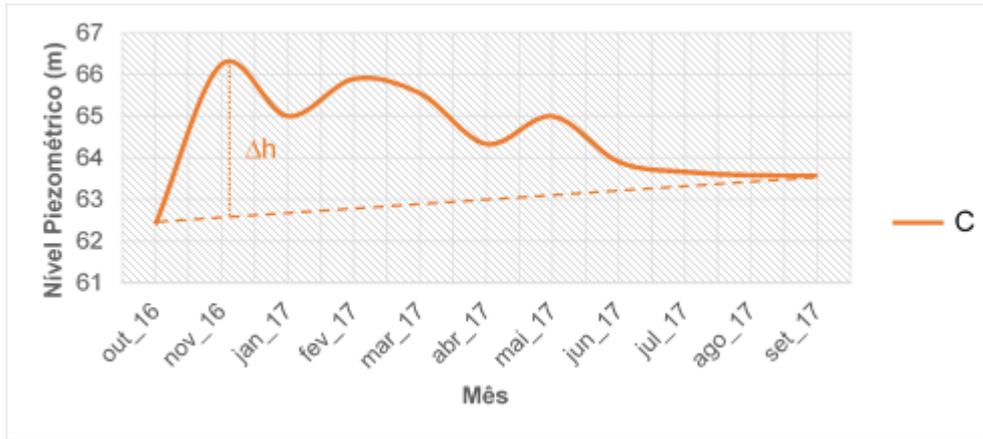


Figura 34 - Variação do nível piezométrico (m) na estação de monitorização C ao longo do ano hidrológico 2016/2017 com representação gráfica de  $\Delta h$ .

Assim,  $\Delta h$  para o caso do furo B seria aproximadamente igual a:

$$\Delta h = 3,77 - 3,2 = 0,57 \text{ m}$$

E, para o caso do furo C seria aproximadamente igual a:

$$\Delta h = 66,4 - 62,5 = 3,9 \text{ m}$$

Para encontrar o valor do S foi utilizada a equação 8, apresentada do capítulo 1.

$$S_{\text{sistema}} = S_{s1}b_1 + S_{s2}b_2 + \dots + S_{sn}b_n \quad (8)$$

Na Tabela 6 são apresentadas algumas propriedades hidráulicas das camadas constituintes do sistema aquífero em estudo, entre as quais os valores máximos e mínimos de  $S_s$  - situações mais favorável e mais desfavorável, respetivamente - e os valores mais comuns de b no contexto do sistema aquífero em estudo.

Tabela 6 - Propriedades hidráulicas das camadas constituintes do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos.

Designação da Camada	Espessura	Aquífero	b	$K_{\min}^a)$ (m/s)	$K_{\max}^{a)2}$ (m/s)	$T_{\min}^b)$ (m <sup>2</sup> /s)	$T_{\max}^b)$ (m <sup>2</sup> /s)	$Ss_{\min}^c)$ (1/m)	$Ss_{\max}^a)$ (1/m)	$n_{\min}^a)$	$n_{\max}^a)$
<b>Formação de Rebolia - Alencarce</b>	50 - 60 m	Aquífero poroso, provavelmente confinado	55	$0,9 \times 10^{-6}$	$6610 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$3,97 \times 10^{-1}$	$0,1 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	0,26	0,53
<b>Finos de Lousões</b>	10 - 20 m	Aquífero poroso semiconfinado a confinado no seu sector central e livre nas zonas aflorantes	15	$0,2 \times 10^{-6}$	$6610 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-1}$	$0,1 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	0,26	0,53
<b>Formação de Trouxemil</b>	10-40 m	Aquífero cársico a poroso, semiconfinado a confinado no seu sector central e livre nas zonas aflorantes	15	$0,1 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-1}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-6}$	0,07	0,56
<b>Formação de Figueira da Foz</b>	10-120 m	Aquífero poroso semiconfinado a confinado no seu sector central e livre nas zonas aflorantes	100	$0,2 \times 10^{-6}$	$6610 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$7,93 \times 10^{-1}$	$0,1 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	0,26	0,53

a) Segundo Morris & Johnson (1967) e Mercer et al (1982); citados em Batu (1998).

b)  $T=b.K$ .

c) Segundo Domenico e Mifflin (1965; citados em Batu).

Com estes valores, foram realizados dois cálculos de  $S$ : um admitindo os valores mínimos de  $S_s$  e outro admitindo os valores máximos.

Assim temos, para os valores mínimos:

$$S_{\text{sistema mín}} = (0,1 \times 10^{-4}) \times 55 + (0,1 \times 10^{-4}) \times 15 + (6,9 \times 10^{-5}) \times 15 + (0,1 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$S_{\text{sistema mín}} = 1,75 \times 10^{-3}$$

E para os valores máximos:

$$S_{\text{sistema máx}} = (4,9 \times 10^{-4}) \times 55 + (4,9 \times 10^{-4}) \times 15 + (3,3 \times 10^{-6}) \times 15 + (4,9 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$S_{\text{sistema máx}} = 8,43 \times 10^{-2}$$

Assim, substituindo os valores obtidos na equação 5 encontraram-se os valores de recarga líquida. Para cada uma das estações foram feitos dois cálculos de recarga, um com o valor de  $S_{\text{sistema mín}}$  e outro com o valor de  $S_{\text{sistema máx}}$ .

Assim para a estação B, com o valor de  $S_{\text{sistema mín}}$ :

$$R = 0,57 \times (1,75 \times 10^{-3})$$

$$R = 9,97 \times 10^{-4} m$$

$$\mathbf{R = 1 mm}$$

Para a mesma estação, com o valor de  $S_{\text{sistema máx}}$ :

$$R = 0,57 \times (8,43 \times 10^{-2})$$

$$R = 4,81 \times 10^{-2} m$$

$$\mathbf{R = 48 mm}$$

Da mesma forma, para a estação C, com o valor de  $S_{\text{sistema mín}}$ , tem-se:

$$R = 3,9 \times (1,75 \times 10^{-3})$$

$$R = 6,83 \times 10^{-3} m$$

$$\mathbf{R = 7 mm}$$

E para a mesma estação, com o valor de  $S_{\text{sistema máx}}$ , tem-se:

$$R = 3,9 \times (8,43 \times 10^{-2})$$

$$R = 3,29 \times 10^{-1}m$$

$$R = 329 \text{ mm}$$

Os resultados obtidos por este método apresentam um intervalo de valores, entre um valor mínimo, que representa a situação mais desfavorável para a recarga, e um valor máximo que representa a situação mais favorável.

### 4.2.3. Método do Balanço Hídrico

#### 4.2.3.1. Balanço Hídrico segundo o método de Thornthwaite e Mather

A área de estudo engloba áreas constituídas por 4 tipos de solos diferentes, como referido no subcapítulo 2.3.3, o que implica diferentes capacidades de campo dos solos. Dessa forma, foram efetuados 4 balanços hídricos diferentes, um para cada tipo de solo.

Para os 4, foram utilizados valores de precipitação e temperatura retirados das normais climatológicas, para Coimbra para o período (1981-2010), referidos no subcapítulo 3.3.

Primeiramente foram calculados os valores de ETP mensais, pelo método de Thornthwaite (1948), tal como referido no capítulo 1. Os resultados estão representados na *Tabela 7*:

*Tabela 7 - Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1981-2010 (retirados de IPMA, 2017)*

1981-2010	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set
<b>T</b>	17,2	13,3	11	9,9	11	13,3	14,5	16,9	20,3	21,9	21,9	20,7
<b>D</b>	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30
<b>H</b>	10,89	9,68	9,18	9,48	10,49	11,70	13,11	14,22	14,82	14,52	13,51	12,20
<b>N</b>	0,94	0,81	0,79	0,82	0,82	1,01	1,09	1,22	1,24	1,25	1,16	1,02
<b>i</b>	6,49	4,40	3,30	2,81	3,30	4,40	5,01	6,32	8,34	9,36	9,36	8,59
<b>l</b>	71,69											
<b>a</b>	1,63											
<b>ETP</b>	62,40	35,33	25,39	22,10	26,22	44,11	55,05	79,20	107,70	123,34	114,78	91,52

Foram então feitos os cálculos do balanço hídrico com o objetivo de encontrar o valor do excedente de água anual, para cada um dos diferentes tipos de solos existentes na área de estudo. Os valores de capacidade de água utilizável, para cada tipo de solo, foram obtidos a partir do grupo hidrológico do solo, disponível no Atlas da Água publicado pela Agência Portuguesa do Ambiente (SNIAmb, 2017) e são de 87 mm/m para os cambissolos cálcicos, de 66 mm/m para os luvisolos rodocrômicos e de 26 mm/m para os podzóis órticos. Os fluvisolos êutricos não apresentam valores de capacidade de água utilizável por se situarem em zona inundável. Os resultados dos cálculos para 100 cm de profundidade de perfil de solo encontram-se na *Tabela 8*, *Tabela 9*, e *Tabela 10*, respetivamente.

*Tabela 8 - Balanço hídrico ao nível do solo, na área de estudo para uma capacidade de água do solo de 87 mm*

Cambissolos cálcicos													
1981-2010	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	Anual
P	116,8	118,1	126,2	107,9	85,7	65,6	87,4	68,7	32,6	10,9	14,3	51,8	886
ETP	62,40	35,33	25,39	22,10	26,22	44,11	55,05	79,20	107,70	123,34	114,78	91,52	787
P-ETP	54,40	82,77	100,81	85,80	59,48	21,49	32,35	-10,50	-75,10	-112,44	-100,48	-39,72	
Rs(k-1)+P-ETP	54,40	137,16	187,81	172,80	146,48	108,49	119,35	76,50	1,41	-111,03	-100,48	-39,72	
Rs	54,40	87,00	87,00	87,00	87,00	87,00	87,00	76,50	1,41	0	0	0	
EXC	0	50,16	100,81	85,80	59,48	21,49	32,35	0	0	0	0	0	350
DEF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	111,03	100,48	39,72	251
ETR	62,40	35,33	25,39	22,10	26,22	44,11	55,05	79,20	107,70	12,31	14,30	51,80	536

*Tabela 9 - Balanço hídrico ao nível do solo, na área de estudo para uma capacidade de água do solo de 66 mm*

Luvisolos rodocrômicos													
1981-2010	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	Anual
P	116,8	118,1	126,2	107,9	85,7	65,6	87,4	68,7	32,6	10,9	14,3	51,8	886
ETP	62,4	35,33	25,39	22,1	26,22	44,11	55,05	79,2	107,7	123,34	114,78	91,52	787
P-ETP	54,40	82,77	100,81	85,80	59,48	21,49	32,35	-10,50	-75,10	-112,44	-100,48	-39,72	
Rs(k-1)+P-ETP	54,40	137,16	166,81	151,80	125,48	87,49	98,35	55,50	-19,59	-112,44	-100,48	-39,72	
Rs	54,40	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	55,50	0	0	0	0	
EXC	0	71,16	100,81	85,80	59,48	21,49	32,35	0	0	0	0	0	371
DEF	0	0	0	0	0	0	0	0	19,59	112,44	100,48	39,72	272
ETR	62,40	35,33	25,39	22,10	26,22	44,11	55,05	79,20	88,10	10,90	14,30	51,80	515

Tabela 10 - Balanço hídrico ao nível do solo, na área de estudo para uma capacidade de água do solo de 26 mm

Podzóis órticos													
1981-2010	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	Anual
<b>P</b>	116,8	118,1	126,2	107,9	85,7	65,6	87,4	68,7	32,6	10,9	14,3	51,8	886
<b>ETP</b>	62,4	35,33	25,39	22,1	26,22	44,11	55,05	79,2	107,7	123,34	114,78	91,52	787
<b>P-ETP</b>	54,40	82,77	100,81	85,80	59,48	21,49	32,35	-10,50	-75,10	-112,44	-100,48	-39,72	
<b>Rs(k-1)+P-ETP</b>	54,40	108,77	126,81	111,80	85,48	47,49	58,35	15,50	-59,59	-112,44	-100,48	-39,72	
<b>Rs</b>	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	15,50	0	0	0	0	
<b>EXC</b>	28,40	82,77	100,81	85,80	59,48	21,49	32,35	0	0	0	0	0	411
<b>DEF</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	59,59	112,44	100,48	39,72	312
<b>ETR</b>	62,40	35,33	25,39	22,10	26,22	44,11	55,05	79,20	48,10	10,90	14,30	51,80	475

Os valores de capacidade de água utilizável são corroborados pelo European Soil Data Centre (ESDAC) (Panagos, Van Liedekerke, Jones & Montanarella, 2012), que referem que os solos existentes na zona têm em geral valores baixos (inferiores a 100 mm), embora se encontrem, nas zonas mais orientais, alguns solos com valores médios (de 100 a 140 mm) e elevados (de 140 a 190 mm) de capacidade de água utilizável (Figura 35).



Figura 35 - Capacidade de água utilizável, segundo o European Soil Data Centre (ESDAC) para o nível do solo (Panagos et al., 2012; Tóth et al., 2017).

Se considerarmos os valores de infiltração como a parte do excedente que não sofre escoamento superficial, então poderemos utilizar os valores dos coeficientes de escoamento, disponíveis para a zona em estudo (SNIAmb, 2017) e estimar um coeficiente de infiltração (capítulo 2, Figura 6).

Na região do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos os valores de coeficientes de escoamento oscilam entre valores muito elevados (acima de 0,95) nas zonas próximas de linhas de água (onde o teor de humidade do solo está próximo da saturação ou em zonas saturadas), em zonas com níveis freáticos muito próximos da superfície do terreno ou em zonas com superfícies impermeabilizadas, nomeadamente zonas urbanas; e valores bastante mais baixos (geralmente entre 0,47 e 0,54) em zonas com condições mais favoráveis à infiltração e que constituem a maior parte da área ocupada por formações geológicas sedimentares cenozoicas ou mesozoicas, porosas e mais permeáveis à água, cuja superfície do terreno é pouco inclinada e não se encontra impermeabilizada (SNIAmb, 2017).

Considerando apenas estas zonas mais favoráveis à infiltração assume-se que a parte do excedente disponível para a infiltração corresponderá a cerca de 50% em média:

Para o caso dos cambissolos cálcicos ficará então

$$R = 350 \times 0,5$$

$$R = 175 \text{ mm}$$

Para os luvisolos rodocrómicos:

$$R = 371 \times 0,5$$

$$R = 176 \text{ mm}$$

E para os podzóis órticos:

$$R = 411 \times 0,5$$

$$R = 206 \text{ mm}$$

#### 4.2.3.2. Balanço Hídrico efetuado em operações com mapas

Para além dos balanços hídricos realizados pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), foram construídos mapas no software ArcGIS 10.2.2 com a precipitação e a evapotranspiração, o coeficiente de escoamento e o coeficiente de infiltração, com o intuito de calcular a recarga usando operações matemáticas com *grids*, recorrendo a malhas 2D idênticas em formato *raster*, disponíveis no Sistema Nacional de Informação de Ambiente (SNIAmb, 2017).

Primeiramente foram utilizando os ficheiros *raster* da precipitação e da evapotranspiração para calcular o *superavit* hídrico (equação 10) a partir da subtração dos dois (Figura 36).

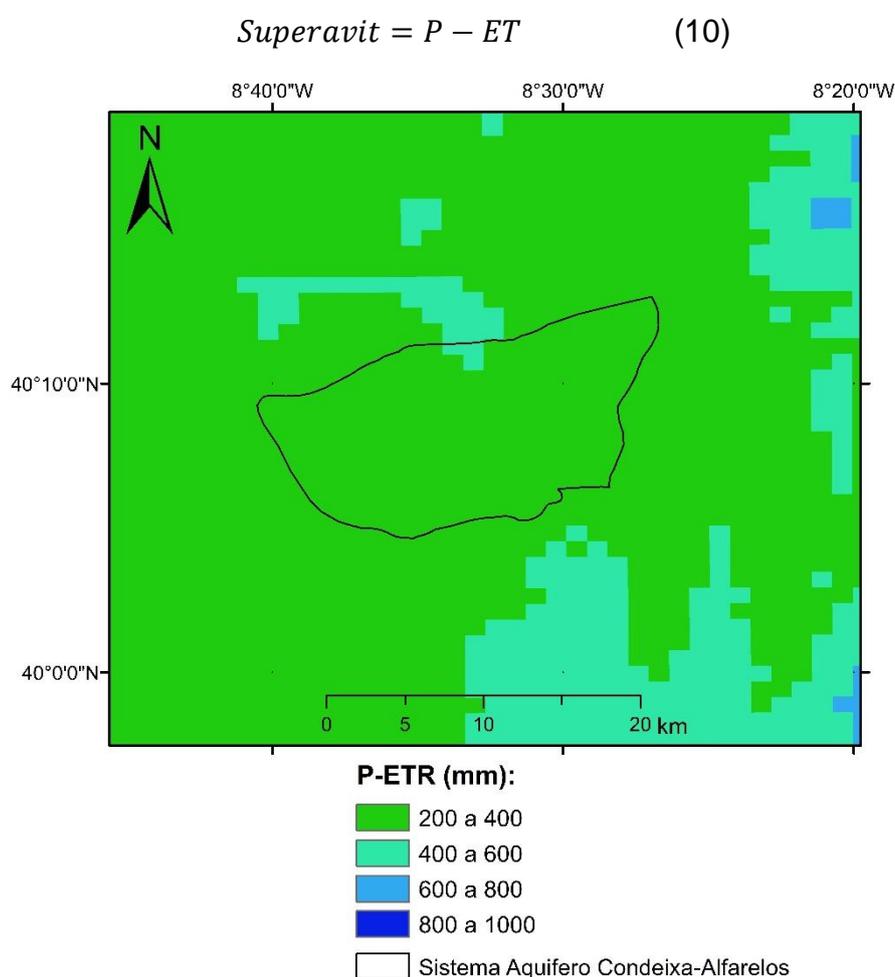


Figura 36 - Superavit hídrico. Criado no software ArcGIS 10.2.2.

Um outro modo de estimar a recarga seria efetuar a subtração do ficheiro *raster* da precipitação com o ficheiro *raster* da evapotranspiração (superavit) e com o ficheiro *raster* do escoamento anual médio de Temez (equação 11), como referido no subcapítulo 2.3.4, a partir da qual foi obtido o resultado da Figura 37.

$$R = P - ET - Esc.Temez \quad (11)$$

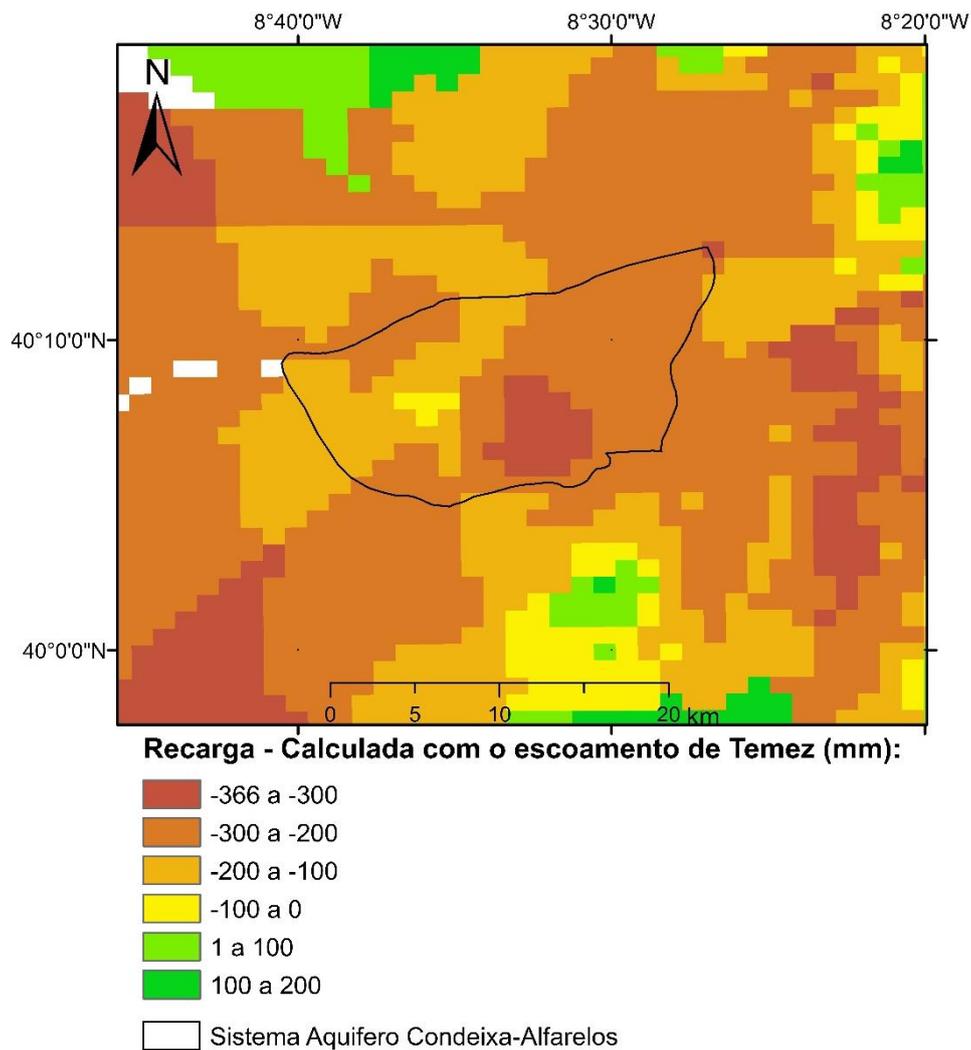


Figura 37 - Recarga bruta (potencial) calculada com base na diferença entre o superavit hídrico e o escoamento anual médio de Temez. Criado no software ArcGIS 10.2.2.

No caso do segundo modo referido no subcapítulo 2.3.4, multiplicou-se o ficheiro *raster* do *superavit* pelo ficheiro *raster* resultante do cálculo do coeficiente de infiltração, a partir da quantidade de precipitação efetiva que não sofre escoamento superficial, originando o mapa apresentado na Figura 38.

$$R = \text{Superavit} \times (1 - C.E.) \quad (12)$$

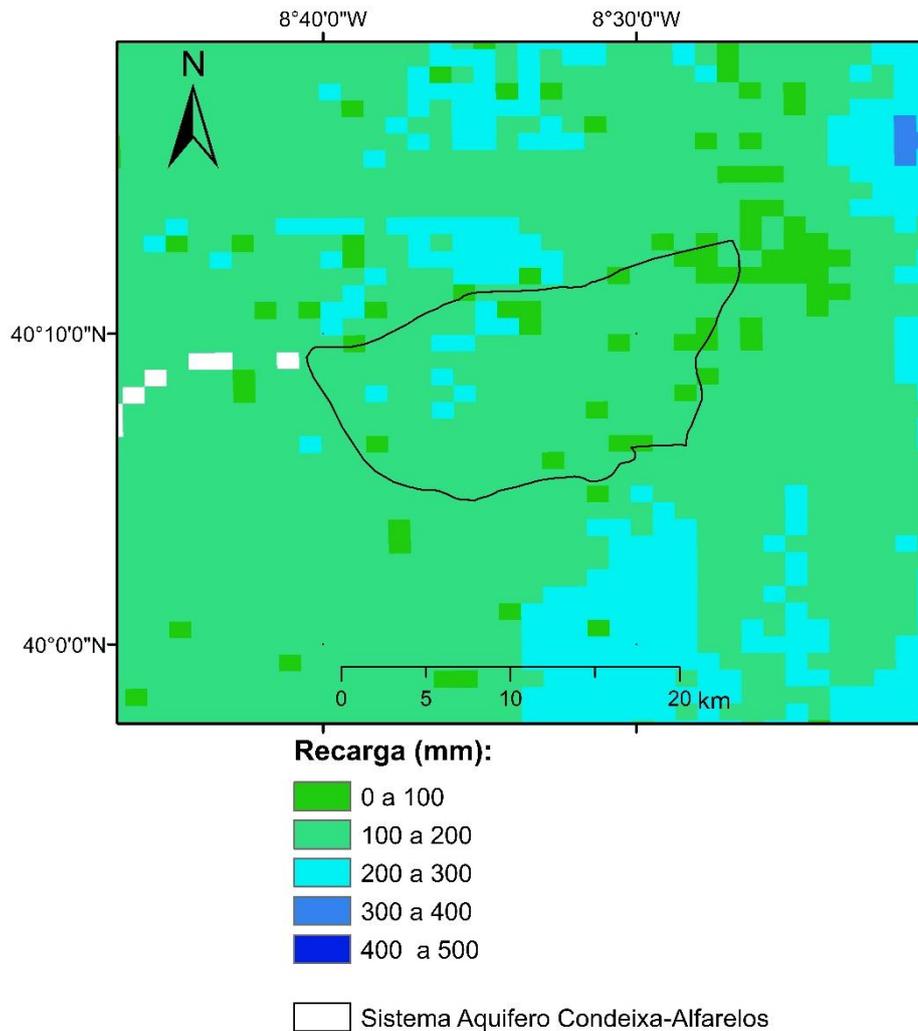


Figura 38 - Recarga bruta (potencial) calculada com base no valor do superavit hídrico e do coeficiente de infiltração. Criado no software ArcGIS 10.2.2.

#### 4.2.4. Método do Balanço de Cloretos

Para realizar a estimação da recarga através do Método do Balanço de Cloretos, foi utilizada a equação 9 apresentada no capítulo 2.

$$R = P \times \frac{Cl_p}{Cl_{gw}}$$

Foram utilizados os valores da concentração de cloretos na água subterrânea de quatro estações de monitorização distintas. Foram utilizadas as estações 1 com o código 240/58, 2 com o código 240/81, 3 com o código 250/35 e 4 com o código 250/6 essas estações correspondem a pontos da rede de monitorização de qualidade de águas subterrâneas do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, que captam no Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (SNIRH, 2017). As análises de cloretos foram efetuadas semestralmente durante um período de tempo entre 2003 e 2015, resultando em cerca de 20 observações por estação, cujo valor médio foi utilizado no cálculo da recarga. A localização das estações, suprarreferidas, na área do sistema aquífero em estudo encontra-se na Figura 39.

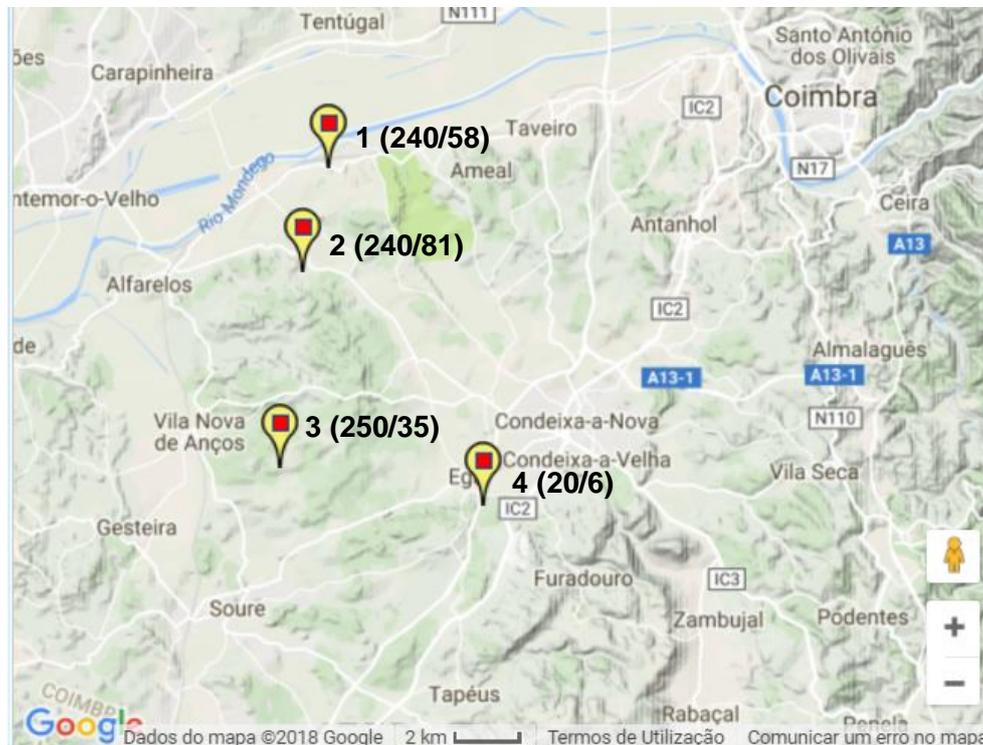


Figura 39 - Localização das estações de monitorização, da Rede de Qualidade utilizadas para os cálculos dos balanços de cloretos. Imagem retirada de <http://snirh.apambiente.pt>

Tabela 11 - Valores médios de  $Cl_{gw}$  nas estações utilizadas para o estudo

Estação	Código SNIRH	Local	Número de análises	$Cl_{gw}$ (mg/L) Média	$Cl_{gw}$ (mg/L) Desvio Padrão	Intervalo de confiança da média (p>95%)
1	240/58	Pereira	21	59,5	18,49	8,4
2	240/81	Figueiró do Campo	20	67,2	50,94	23,8
3	240/35	Soure	20	46,1	4,07	1,9
4	250/6	Ega	20	24,2	2,80	1,3

O valor da precipitação média anual, P, utilizado nos cálculos foi o mesmo utilizado nos balanços hídricos sequenciais ao nível do solo e é de 886 mm/ano (valores das normais climatológicas do período de 1981-2010, segundo IPMA, 2017). A concentração de cloretos presentes na água da chuva  $Cl_p$  utilizado foi o valor de 154  $\mu\text{Eq/L}$ , obtido para o ano hidrológico de 2009 por Santos *et al* (2011).

Para proceder ao cálculo foi ainda necessário garantir que os valores de  $Cl_p$  e  $Cl_{gw}$  estivessem representados nas mesmas unidades, então foi feita a conversão do valor de  $Cl_p$  de 154  $\mu\text{Eq/L}$  para mg/L, da seguinte forma:

$$154 \mu\text{Eq/L} = 0.154 \text{ mEq/L}$$

$$\text{mEq/L} = \frac{\text{mg/L}}{\text{peso equivalente}} = \frac{\text{mg/L}}{\frac{\text{peso molecular}}{\text{valência}}}$$

Sendo os valores do peso molecular de  $\text{Cl}^-$  de 35,5 e a sua valência de -1.

$$0,154 = \frac{\text{mg/L}}{\frac{35,5}{1}}$$

$$\text{mg/L} = 0,154 \times 35,5$$

$$Cl_p = 5,5 \text{ mg/L}$$

Desta forma, e com todos os valores definidos, nas unidades corretas, foi feita a aplicação direta na equação do método e foram encontrados os valores finais da estimação da recarga.

Assim, utilizando a equação 1, tem-se para a estação 1:

$$R = 886 \times \frac{5,5}{59,5}$$

$$\mathbf{R = 81 \text{ mm}}$$

Da mesma forma, tem-se para a estação 2:

$$R = 886 \times \frac{5,5}{67,2}$$

$$\mathbf{R = 73 \text{ mm}}$$

Para a estação 3:

$$R = 886 \times \frac{5,5}{46,1}$$

$$\mathbf{R = 106 \text{ mm}}$$

E, por fim, para a estação 4:

$$R = 886 \times \frac{5,5}{24,2}$$

$$\mathbf{R = 201 \text{ mm}}$$

### 4.3. Análise de resultados

A recarga hídrica natural do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos é feita, maioritariamente, de forma direta através da infiltração da água, com origem na precipitação, nas zonas de afloramento das unidades aquíferas, em que o sistema aquífero passa a ser não confinado. Pode ainda ocorrer recarga do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos, a partir de unidades aquíferas subjacentes, como é o caso das que pertencem à Formação de Taveiro, já que o nível piezométrico existente nos níveis lenticulares desta formação é superior ao nível piezométrico da água nas unidades aquíferas do sistema aquífero confinado (Almeida et al., 2000). Assim pode haver drenância descendente de água, das unidades aquíferas da Formação de Taveiro para unidades aquíferas inferiores (Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos), desde que existam caminhos preferenciais, nomeadamente fraturas não preenchidas com elevada extensão vertical. No entanto, dada a elevada espessura da Formação de Taveiro (170 m) e a sua constituição argilosa, este processo a existir poderá ser bastante lento.

No que diz respeito à zonografia da recarga, e à semelhança do que foi referido anteriormente, as zonas onde ocorre recarga coincidem com as áreas de afloramento das unidades aquíferas.

A Figura 40 apresenta as áreas de afloramento das unidades aquíferas do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (a tracejado) e as unidades aquíferas suspensas e aquíferos não confinados superiores (a ponteados), sobrepostas ao mapa de recarga obtido através do cálculo do balanço hídrico em 4.3.2. Observa-se que a zona de recarga do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos, a sul e a oeste, está na sua maioria colocada sobre manchas de quantidade de recarga entre 100 e 200 mm, estando os raros pixéis onde a recarga é maior do que 200 mm sob manchas ocupadas pelos níveis aquíferos suspensos e não confinados superiores.

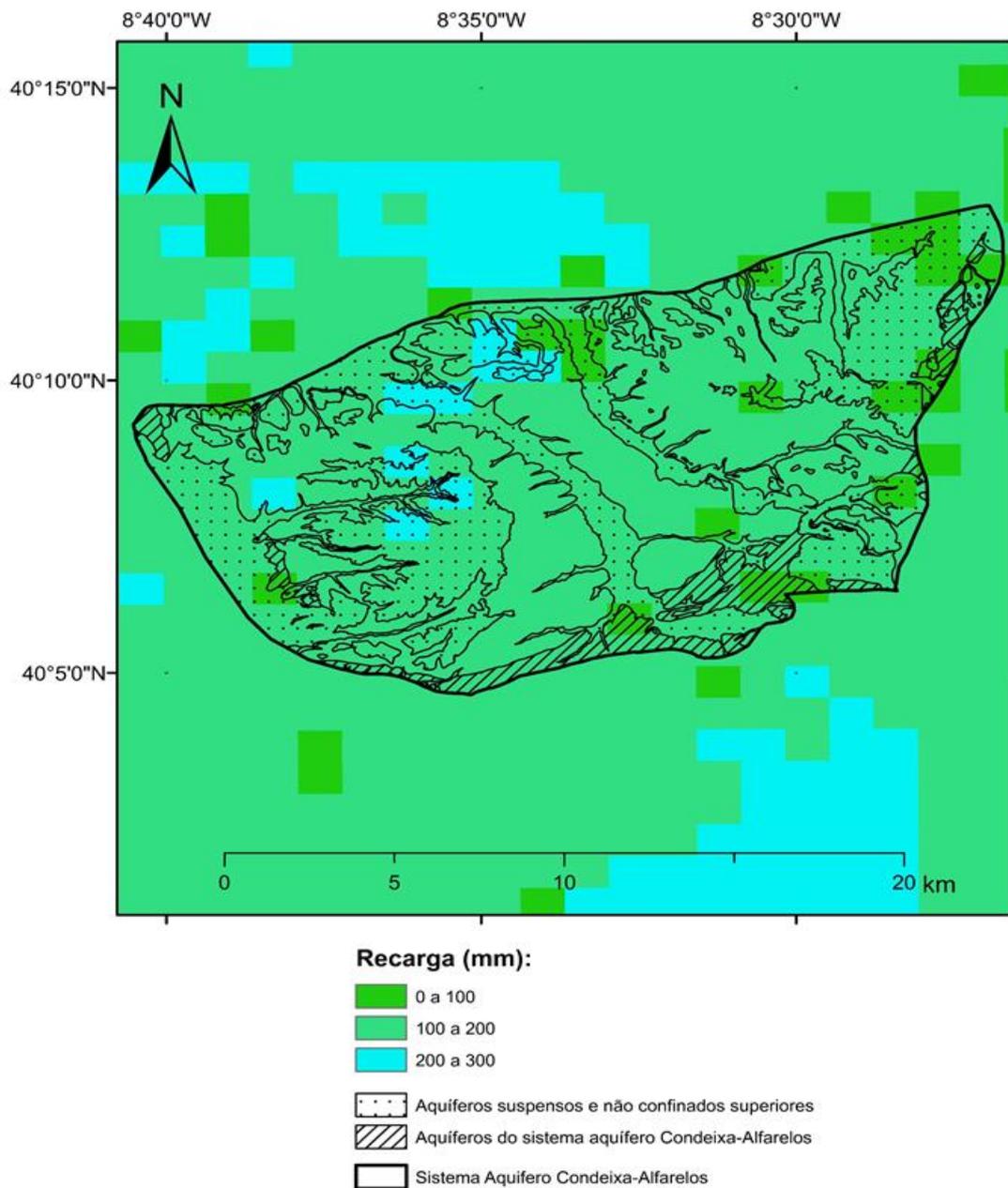


Figura 40 - Áreas de afloramento dos aquíferos sobrepostas ao mapa da recarga bruta (potencial) calculada com base no valor do superavit hídrico e no coeficiente de infiltração. Criado no software ArcGIS 10.2.2.

No que diz respeito à quantificação da recarga, os resultados obtidos através da utilização dos vários métodos de estimação, encontram-se sintetizados no quadro resumo apresentado na *Tabela 12*.

Tabela 12 - Estimativas de valores de recarga (mm) obtidas através da aplicação dos vários métodos utilizados.

Método		Recarga
		(mm)
Flutuações do nível freático		Estação A 150-190
Hidrograma de Furo		Estação B 1 – 48
		Estação C 7 – 329
Balanço Hídrico	Thorntwaite e Mather (1955)	Cambissolos 175
		Luvissolos 176
		Podzóis 206
	ArcGIS	(P-ET) x C. de infiltração 100 – 200
		P-ET - Esc. Temez ~ 0
Balanço de Cloretos		Estação 1 81
		Estação 2 73
		Estação 3 106
		Estação 4 201

De forma geral, todos estes resultados são semelhantes entre si e vão de encontro à estimativa feita por Almeida *et al.* (2000) de uma recarga de cerca de 150 mm anuais para o Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos.

Foi ainda utilizada uma aproximação ao caso em estudo, através da estimação da recarga para um aquífero livre localizado numa zona com características semelhantes, utilizando o método das flutuações do nível freático. A similaridade entre o aquífero para o qual estes cálculos foram realizados e as unidades aquíferas freáticas superiores existentes na área em estudo, bem como a semelhança dos seus enquadramentos climatológicos resultantes da sua proximidade geográfica, permitem assumir este valor de recarga como semelhante ao valor da recarga na área estudada. Foi, assim, obtido um valor entre 150 e 190 mm, que pode representar uma estimativa da situação real dos aquíferos freáticos existentes na zona, em comparação com os valores obtidos pelo método do hidrograma de furo que estima valores de recarga de níveis aquíferos confinados mais profundos.

No caso do método do hidrograma de furo, o facto de terem sido utilizados valores de  $S$  calculados através  $S_s$  tabelados, pode ter acrescentado um certo grau de imprecisão aos resultados finais da recarga obtidos por este método. Ainda assim, os valores de  $S$  determinados neste estudo estão de acordo com valores obtidos em aquíferos semelhantes, como é o exemplo do Sistema Aquífero Cretácico de Aveiro, para o qual foi definido um valor de  $S$  entre  $10^{-6}$  a  $10^{-2}$  por Almeida *et al.* (2000). Os resultados da recarga estimados por este método podem ser considerados extremos, já que resultam dos cenários mais e menos favoráveis, sendo que os valores mínimos podem ser mesmo considerados praticamente impossíveis

No caso dos valores de recarga estimados com base nos valores de excedente de água calculados através do método do balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955), os resultados variam, aproximadamente, entre os 170 e os 200 mm anuais.

Os mapas de recarga obtidos através de operações de *grids* em mapas, construídos no ArcGIS, apresentam valores de recarga nula, no caso da subtração do escoamento de Temez ao *superavit* hídrico, o que constitui a situação menos favorável; e valores entre 100 e 200 mm, no caso da multiplicação do *superavit* hídrico pelo coeficiente de infiltração obtido a partir do coeficiente de escoamento. Apesar destas estimativas poderem ter, cada uma delas, erros associados, é possível afirmar que os valores de recarga verdadeiros não devem estar muito longe do cenário mais favorável.

Por fim, em relação aos resultados obtidos pelo método do balanço de cloretos (entre 80 e 230 mm) é importante ter em conta o facto de os valores da concentração de cloretos na água subterrânea mais recentes serem de 2015, o que poderia levar a que os resultados não fossem os mais atualizados possível. No entanto, dado o desfasamento temporal entre o momento da infiltração da água e o da recolha da amostra isso não deverá ser muito relevante.

De um ponto de vista crítico, o presente trabalho apresenta algumas fraquezas, nomeadamente o facto de terem sido utilizados dados já existentes aos invés de terem sido recolhidos dados novos e o facto de alguns dos valores utilizados apresentarem um grau de incerteza que pode ter originado resultados pouco precisos, como foi o caso do coeficiente de armazenamento ( $S$ ), no método do hidrograma de furo, que esteve na origem dos valores exagerados (máximo e mínimo) da estimativa de recarga obtida por esse método. Caso houvesse valores considerados médios esse erro poderia ter sido minimizado.

## **5. Conclusões**

O trabalho de investigação desenvolvido permitiu aumentar o conhecimento da recarga nas unidades constituintes do Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31) bem como da recarga nas unidades aquíferas suspensas e não confinadas superiores existentes na mesma área.

O objetivo principal do trabalho foi contribuir para a caracterização e quantificação da recarga aquífera na área em estudo.

Foi feita a caracterização dos processos de recarga existentes, bem como da zonografia da mesma e foram utilizados diferentes métodos para fazer a sua quantificação, que no geral deram resultados semelhantes.

Assim, os valores de recarga obtidos pelos diferentes métodos apresentam alguma consistência entre si e entre valores obtidos em estudos anteriores, variando, na sua grande maioria, entre os 100 e os 200 mm anuais o que corresponde a uma recarga inferior a 20% da quantidade de precipitação anual.

## Bibliografia

- Almeida, C., Mendonça, J. J., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental - Sistema Aquífero: Condeixa-Alfarelos (O31)*. Lisboa: Centro de Geologia/Instituto da água.
- Associação Portuguesa do Ambiente (2012). *Plano Geral de Bacias Hidrográficas dos Rios Vouga, Mondego e Lis integradas na Região Hidrográfica 4 (PGBH4)*. Disponível em: <https://apambiente.pt>
- Associação Portuguesa do Ambiente (2017). *SNIAmb: Visualizador SNIAmb*. Disponível em: <https://sniamb.apambiente.pt>
- Azevedo, J. M. (2015). *Apontamento Teóricos- Disciplina de Hidrogeologia Aplicada*.
- Batu, V. (1998). *Aquifer Hydraulics: A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Brigitta Tóth, Melanie Weynants, László Pásztor & Tomislav Hengl, (2017). 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. In *Hydrological Processes*, John Wiley & Sons Ltd, Vol.31 Issue 14, 1 July 2017, 2497–2666 (pages 2662–2666);DOI:10.1002/hyp.11203;<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.11203/full>
- Brown K, Harrington G, Lawson J (2006). *Review of groundwater resource condition and management principles for the Tertiary Limestone Aquifer in the south east of South Australia*. Department of Water, Land and Biodiversity Conservation, Naracoorte, Australia
- Corine Land Cover (2012). Disponível em: <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/view>
- Costa, J. E. (2017). *Sistema Aquífero Condeixa-Alfarelos (O31): Modelação hidrogeológica conceptual*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Crosbie, R. S., Davies, P., Harrington, N., & Lamontagne, S. (2015). Ground truthing groundwater-recharge estimates derived. *Hydrogeology Journal*, 23 (2), 335–350.
- Delleur, J. W. (Ed) (2007). *The Handbook of Groundwater Engineering*. (2nd. Ed). New York: CRC Press
- Diretor-Geral do Território (2016). *Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP)*. Disponível em: <http://www.dgterritorio.pt>

- Doble, R. C., & Crosbie, R. S. (2017). Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. *Hydrogeology Journal*, 25, 3-23
- European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre
- Healy, R. W., & Scanlon, B. R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. Austin, Texas: Cambridge University Press.
- Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014). *Hydrogeology: Principles and Practice* (2nd Ed.). New York: Wiley Blackwell.
- Instituto Geográfico do Exército (2001). Carta Militar do Exército, Folha nº 230 – Coimbra, escala 1:250000; Folha nº 240 – Montemor-o-Velho, escala 1:250000; Folha nº 241 – Coimbra-Sul, escala 1:250000; Folha nº 250 – Soure, escala 1:250000; Folha nº 251 – Condeixa-a-Nova. Lisboa.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2017). O Clima: Normais climatológicas Coimbra 1981-2010. Disponível em: <http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- Kemper, K. E. (2004). Groundwater: from development to management. *Hydrogeology Journal*, 12, 3-5.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. Meteorol. Z., Vol. 15, 259 – 263.
- Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A. C., Callapez, P., Duarte, L. V., Kullberg, M. C., Martins, L., Miranda, R., Alves, C., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., Moreira, M., Nogueira, C. R. (2013). *A Bacia Lusitana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica*. Geologia de Portugal, Vol. II: Geologia Meso-cenozóica de Portugal. Lisboa: Livraria Escolar Editora, 2013, Cap. III.3., p. 195-347
- Manuppella, R., Rocha, R. B., Soares, A. F., Mouterde, R., & Perrot, C. (1976). Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50.000: Folha 19-C (Figueira da Foz). Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Marques, J. F., Sequeira, A. J., Callapez, P., Cunha, P., Gomes, E., & Sampaio, J. E. (2005). Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50.000: Folha 19-D (Coimbra-Lousã). Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal

- Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L., (2012). European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. *Land Use Policy*, 29 (2), 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003
- Rocha, R. B., Manuppella, G., Mouterde, R., Ruger, C., Zbyszewski, G., Ferreira, O. V., Soares, A. F., Pais, J. C. (1981). Notícia explicativa da Folha 19-C (Figueira da Foz). Lisboa: Serviços geológicos de Portugal
- Santos, S. P., Otero, M., Santos, B. S., & Duarte, A. C. (2011). *Chemical composition of rainwater at a coastal town on the southwest of Europe: What changes in 20 years?* *Science of the Total Environment*, 6.
- Soares, A. F., Marques, J. F., Sequeira, A. J., Callapez, P., Cunha, P., Duarte, L. V., Gomes, E., Kullberg, J. C., Monteiro, A. J. N., Pereira, E. S., Pereira, L. C. G., Rocha, R., Sampaio, J. E. (2005). Notícia explicativa da Folha 19-D (Coimbra-Lousã). Lisboa: Serviços Geográficos de Portugal.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (1995-2018). *Redes de Monitorização*. Disponível em: <http://snirh.apambiente.pt/>
- Tóth B., Weynants M., Nemes A, Makó A., Bilas G. & Tóth G. (2014). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*. Doi: 10.1111/ejss.12192
- Wood WW (1999). *Use and misuse of the chloride-mass balance method in estimating ground water recharge*. *Ground Water* 37, 2–3

