

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Composição Química e Isotópica da Massa de Água Cársico da  
Bairrada: contributo para a consolidação do modelo conceptual  
do sistema aquífero**

Ricardo Jorge dos Reis Sampaio Lourenço

**Mestrado em Geologia Aplicada**  
Ramo de Hidrogeologia

Trabalho de Projecto orientado por:  
Professora Doutora Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho

2018



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Composição Química e Isotópica da Massa de Água Cársico da  
Bairrada: contributo para a consolidação do modelo conceptual  
do sistema aquífero**

Ricardo Jorge dos Reis Sampaio Lourenço

**Mestrado em Geologia Aplicada**  
Ramo de Hidrogeologia

Trabalho de Projecto orientado por:  
Professora Doutora Maria do Rosário da Encarnação de Carvalho

2018

**O presente trabalho não está redigido segundo as normas do novo acordo ortográfico.**

## **Agradecimentos**

O desenvolvimento deste trabalho de investigação representou para mim a oportunidade de voltar a desenvolver competências na área da Geologia, assim como trabalhar num projecto pessoal de âmbito científico. Quero agradecer assim a todos os envolvidos durante este percurso.

Um agradecimento especial á Professora Doutora Maria Rosário Carvalho por todo o seu apoio, encorajamento e paciência, assim como os conhecimentos transmitidos ao longo de todo este projecto.

Agradeço também á Professora Doutora Catarina Silva por me ter aberto o caminho para esta oportunidade, assim como aos restantes professores envolvidos no respectivo curso, pelos conhecimentos que adquiri ao longo do mesmo.

Um agradecimento a todos os amigos que me encorajaram e apoiaram durante a realização do curso.

Um agradecimento muito especial aos meus pais, por me terem dado a oportunidade de voltar a estudar, assim como todo o apoio e compreensão durante este percurso.

## Resumo

A Massa de Água “Cársico da Bairrada” está localizada numa zona que se divide pelos distritos de Aveiro e Coimbra, entre as bacias hidrográficas do Vouga, Mondego, e Lis, e é fonte de abastecimento a vários concelhos da região. Desenvolve-se essencialmente em rochas carbonatadas do Jurássico e Cretácico, possuindo as características típicas de um aquífero cársico.

O Relatório aqui apresentado resulta do trabalho de investigação desenvolvido sobre a Massa de Água “Cársico da Bairrada” com o objectivo de aprofundar o conhecimento sobre a hidrogeoquímica e a composição isotópica da massa de água, identificar processos de interacção água-rocha e avaliar a recarga, de modo a contribuir para a consolidação do modelo conceptual do sistema aquífero. Este estudo baseou-se na amostragem de 12 locais (nascentes, poços e furos de captação) e análises físico-químicas e isotópicas (isótopos estáveis  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , e isótopo radioactivo Trítio).

A massa de água apresenta composição de fácies bicarbonatada cálcica. A condutividade eléctrica varia entre 252,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 965,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . É observada uma diferença na mineralização entre águas recolhidas em poços e em furos. A composição das águas subterrâneas está fortemente dependente de processos de interacção água-rocha. Os índices de saturação da água em relação a diversas fases sólidas e gasosas revelam que, quase todas, estão em equilíbrio ou próximo do equilíbrio com a calcite e calcedónia.

A modelação hidrogeoquímica da dissolução de calcite em sistema fechado ou aberto mostrou ser possível distinguir águas com características de circulação em aquífero carbonatado pouco profundo (águas recolhidas em poços) a águas de circulação em aquífero carbonatado profundo (águas de furos).

A composição isotópica das águas amostradas em  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  revela que as águas subterrâneas são de origem meteórica, com valores variando entre -4,92‰ e -3,51 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$ , e entre de -26,6‰ e -18,8‰ para  $\delta^2\text{H}$ . As águas com maior enriquecimento em isótopos pesados foram recolhidas em poços revelando alguma evaporação. O conteúdo das águas em Trítio revelou idades aproximadas de cerca de 20 anos.

A superfície piezométrica da massa de água acompanha o relevo da região. A piezometria mais elevada localiza-se na zona centro Sul do sistema, próximo de Cantanhede. As zonas de topografia e piezometria mais elevada poderão pertencer a zonas de recarga principais do sistema, distribuindo a água nas direcções NW, N e NE. Foi avaliada em 23 % a possível taxa de infiltração do sistema aquífero, tendo em consideração a área de contribuição para a zona da nascente Olhos de Fervença e o caudal aí descarregado, correspondendo a 227 mm/ano da recarga da Massa de Água Cársico da Bairrada.

Palavras-chave: Aquífero cársico; Hidrogeoquímica; Dissolução carbonatos; Isótopos estáveis; Modelo conceptual.

## Abstract

The "Cársico da Bairrada" Water Body is located in an area divided by the districts of Aveiro and Coimbra, between the hydrographic basins of Vouga and Mondego, and is a source of water supply to several municipalities in the region. It develops mainly in carbonate rocks of the Jurassic and Cretaceous, possessing the typical characteristics of a karst aquifer.

The work presented here is the result of the research carried out on the "Cársico da Bairrada" Water Body, with the objective of deepening knowledge about hydrogeochemistry and the isotopic composition of the water mass, identifying processes of water-rock interaction and evaluating the recharge, in order to contribute to the consolidation of the conceptual model of the aquifer system. This study was based on the sampling of 12 sites, (springs, wells and bore holes) and physicochemical and isotopic analyzes (stable isotopes  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ , and tritium radioactive isotope).

The groundwater body presents calcium bicarbonate facies composition. The electrical conductivity varies between 252.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  and 965.8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A difference in water mineralization between wells and bore holes is observed. The composition of groundwater is strongly dependent of water-rock interaction processes. The water saturation indices for various solid and gaseous phases show that almost all are either close to or in equilibrium with calcite and chalcedony.

The hydrogeochemical modeling of calcite dissolution in closed or opened system, showed that it is possible to distinguish waters with characteristics of circulation in a shallow carbonated aquifer (water collected in wells), from waters circulating in a deep carbonate aquifer (water from bore holes).

The isotopic composition in  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of the sampled waters reveals that the groundwater is of meteoric origin, with values ranging between -4.92 ‰ and -3.51 ‰ for the  $\delta^{18}\text{O}$ , and between -26.6 ‰ and -18, 8 ‰ for the  $\delta^2\text{H}$ . The waters with the greatest enrichment in heavy isotopes were collected in wells revealing some evaporation. The content of the waters in Tritium revealed approximate ages of about 20 years.

The piezometric surface of the water body follows the topography of the region. The highest hydraulic head is located in the South-central zone of the system, near Cantanhede. The zones of higher topography and hydraulic heads may belong to the main recharge zones of the system, distributing the water toward NW, N and NE. The possible infiltration rate of the aquifer system was evaluated in about 23 % of the precipitation, taking into account the groundwater contribution to the Olhos de Fervença spring area and the discharged flow rate, corresponding to 227 mm/year of recharge in the "Cársico da Bairrada" Water Body.

Keywords: karst aquifer; Hydrogeochemistry; Carbonates Dissolution; Stable isotopes; Conceptual model.

# Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract .....	iv
1 Introdução.....	1
1.1 Objectivos.....	2
1.2 Metodologia.....	2
2 Aquíferos Cársicos e sua Utilização em Portugal .....	3
2.1 Circulação da Água em Aquíferos Cársicos.....	3
2.2 Composição Química da Água de Aquíferos Cársicos .....	4
2.2.1 Dissolução de Carbonatos .....	5
2.2.2 Dissolução em Sistema Aberto e Sistema Fechado.....	8
3 Sistema Aquífero Cársico da Bairrada .....	9
3.1 Caracterização Climática.....	9
3.2 Enquadramento Geológico .....	12
3.3 Geomorfologia.....	16
3.4 Tectónica .....	17
3.5 Hidrologia e Hidrogeologia.....	18
4 Amostragem e Métodos Analíticos .....	23
5 Piezometria do Sistema Aquífero.....	26
6 Estudo Físico-Químico da Massa de Água .....	30
6.1 Fácies Hidrogeoquímica.....	30
6.2 Parâmetros Físicos e Composição Química .....	31
6.2.1 Temperatura.....	31
6.2.2 pH.....	31
6.2.3 Condutividade Eléctrica .....	32
6.3 Índices Hidrogeoquímicos.....	35
6.3.1 Índice $rCa^{2+}/rHCO_3^-$ .....	35
6.3.2 Índice $rMg^{2+}/rHCO_3^-$ .....	36
6.3.3 Índice $rNa^+/rCa^{2+}$ .....	36
6.3.4 Índice $rNa^+/rCl^-$ .....	37
6.3.5 Índice $rNO_3^-/rSO_4^{2-}$ .....	38

6.3.6	Índice $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Ca}^{2+}$ .....	38
6.4	Índices de Saturação .....	39
6.4.1	Conceitos Termodinâmicos .....	39
6.4.2	Cálculo dos IS da Água .....	40
6.5	Modelação de Sistemas Abertos e Fechados .....	43
7	Estudo Isotópico .....	46
7.1	Isótopos no Ciclo Hidrológico .....	46
7.2	Isótopo Radioactivo Trítio .....	46
7.2.1	Decaimento Radioactivo .....	46
7.2.2	O Isótopo Radioactivo Trítio .....	47
7.2.3	Trítio na Massa de Água .....	48
7.3	Isótopos Estáveis de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ .....	49
7.3.1	Razões Isotópicas e Fraccionamento .....	49
7.4	Isótopos Estáveis de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ na Massa de Água .....	55
8	Integração de Resultados e Conclusões .....	58
9	Bibliografia .....	63
10	Anexos .....	64

## Índice de Figuras

Figura 1.1 – Localização da Massa de Água Subterrânea Cársico da Bairrada. ....	1
---	---

Figura 2.1 - Esquema de um aquífero cársico, apresentando dois tipos de recarga (autogénica e alogénica), infiltração (concentrada e difusa) e formas de escoamento (galerias ou na matriz), adaptado de Goldscheider <i>et al.</i> , (2007 in Calçada, 2016). ....	4
---	---

Figura 2.2– Representação gráfica da variação da concentração das espécies carbonatadas em função do pH a 25C°, assumindo $C_T=10^{-3}$ (Carbono total). As linhas a tracejado representam as concentrações de $\text{H}^+$ e $\text{OH}^-$ , independentes de $C_T$ , adaptado de Langmuir, (1997). ....	6
---	---

Figura 2.3 – Descrição esquemática da solubilidade da calcite em águas naturais. As águas estão saturadas em calcite acima e à esquerda da linha da calcite, e subsaturadas em calcite, abaixo e a direita da linha da calcite, adaptado de Langmuir, (1997). ....	7
--	---

Figura 2.4 - Concentrações de $C_T$ (Carbono total) e de espécies carbonatadas em função do pH, para a dissolução de calcite a 25 C°, a pressão total de 1 bar para sistemas abertos (a) e fechados (b). A pressão de $CO_2$ é assumida como constante a $10^{-1.5}$ bar para os sistemas abertos, no qual corresponde à actividade de $10^{-3.0}$ mol/kg de $H_2CO_3^*$ . Para o sistema fechado a pressão inicial de $H_2CO_3^*$ é de $10^{-3.0}$ mol/kg a pH=3. Em ambos os diagramas encontra-se representada a curva de saturação da calcite com as respectivas concentrações em $Ca^{2+}$ , adaptado de Langmuir, (1997). .....	9
Figura 3.1– Gráfico com precipitação média, temperatura média, e evapotranspiração potencial média para a bacia do Vouga. ....	10
Figura 3.2– Gráfico com precipitação média, temperatura média, e evapotranspiração potencial média para a bacia de Lis. ....	11
Figura 3.3 – Gráficos da velocidade média do vento e frequência por rumo para a estação de Coimbra, in ARH (2012). ....	11
Figura 3.4 – Enquadramento Geológico da Massa de Água “Cársico da Bairrada”, adaptado de Almeida <i>et al.</i> , (2000). ....	12
Figura 3.5 - Coluna litoestatigráfica geral da zona de estudo, adaptado de Barbosa <i>et al.</i> , (1988). ....	14
Figura 3.6 – Mapa geomorfológico da Massa de Água Cársico da Bairrada. ....	16
Figura 3.7 - Esboço estrutural da zona de estudo. A massa de Água Cársico da Bairrada localiza-se nas zonas de Cantanhede Ourentã e Lapa, adaptado de Barbosa <i>et al.</i> , (1988). ....	18
Figura 3.8 – Bacias hidrográficas e suas respectivas redes de drenagem na área do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada. ....	19
Figura 3.9– Escoamento superficial médio e precipitação média mensal para as bacias hidrográficas do Vouga e do Lis. ....	20
Figura 3.10 – Variação piezométricas anuais (meses de Janeiro e Marco) registadas em dois piezómetros monitorizados no sistema aquífero, in Almeida <i>et al.</i> , (2000). ....	21
Figura 3.11– Diagrama de Piper com a representação da composição das águas do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, in Almeida <i>et al.</i> , (2000). ....	23

Figura 4.1- Localização dos locais de amostragem na área da Massa de Água Cársico da Bairrada....	24
Figura 4.2 – Nascente de Olhos de Fervença. É possível visualizar duas das oito captações existentes. .....	24
Figura 5.1 – Representação da piezometria na área do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada (interpolação obtida por <i>krigagem</i> ) em conjunto com a rede de drenagem, sobre carta hipsométrica.	27
Figura 5.2 - Visualização do nível piezométrico em conjunto com a topografia da região do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada.....	28
Figura 5.3 - Representação da profundidade da água na área do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada (interpolação obtida por <i>krigagem</i> ) em conjunto com a rede de drenagem, sobre carta hipsométrica.	29
Figura 6.1- Representação da composição das amostras em diagrama de Piper.....	30
Figura 6.2 - Gráfico com a variação da alcalinidade ( $\text{CaCO}_3$ ) em função do pH nas águas amostradas. .....	32
Figura 6.3– Gráfico com a correlação entre o $\text{HCO}_3^-$ e condutividade eléctrica das águas amostradas. .....	33
Figura 6.4 – Grafico com a correlação entre a dureza total e condutividade eléctrica das águas amostradas.....	33
Figura 6.5 - Gráfico com a correlação entre o magnésio dissolvido e a condutividade eléctrica das águas amostradas.....	33
Figura 6.6 - Gráfico com a correlação entre $\text{SiO}_2$ dissolvida e a condutividade eléctrica das águas amostradas. Observam-se duas correlações distintas.....	34
Figura 6.7 - Gráfico com a correlação do ião cloreto com a condutividade eléctrica das águas amostradas.....	35
Figura 6.8 – Correlação entre os iões de cálcio e bicarbonato nas águas amostradas.....	35

Figura 6.9 – Gráfico com a correlação entre o ião magnésio e o ião bicarbonato nas águas amostradas. ....	36
Figura 6.10 - Gráfico com a correlação entre os iões sódio e o cálcio. ....	37
Figura 6.11 – Gráfico com a correlação entre os iões de sódio e de cloro. ....	37
Figura 6.12 – Gráfico com a relação entre os iões nitrato e sulfato. ....	38
Figura 6.13 - Grafico com a relação entre os iões sulfato e cálcio. ....	39
Figura 6.14 – Índices de saturação das águas amostradas nos furos e na nascente de Olhos de Fervença. ....	41
Figura 6.15 – Índices de saturação das águas amostradas nos poços e na nascente do Outeiro. ....	42
Figura 6.16– Índices de saturação da água da nascente das Sete Fontes em relação a diversas fases sólidas e gasosa. ....	42
Figura 6.17 – Gráfico representativo da evolução do pH da água com dissolução de calcite em sistema aberto (pH S.Aberto) e fechado (pH S.Fechado). As linhas horizontais representam o pH medido nas águas Casal de Cadima (CCa), Olhos de Fervença (O.F) e Mealhada (Mda). ....	43
Figura 6.18 – Gráfico representativo da evolução da concentração do cálcio dissolvido, com a dissolução de calcite em sistema aberto (Ca S.Aberto) e sistema fechado (Ca S.Fechado). As linhas horizontais representam a concentração do ião de cálcio encontrada nas águas Casal de Cadima (CCa), Olhos de Fervença (O.F.) e Mealhada (Mda). ....	44
Figura 6.19 - Gráfico representativo da evolução da concentração do ião bicarbonato com o aumento da dissolução de calcite em sistema aberto (HCO <sub>3</sub> S.Aberto) e sistema fechado (HCO <sub>3</sub> S.Fechado). As linhas horizontais representam a concentração de bicarbonato nas águas de Casal de Cadima (CCa), Olhos de Fervença (O.F.) e Mealhada (Mda). ....	44
Figura 6.20 - Gráfico representativo da evolução índice de saturação em sistema aberto e fechado com o aumento da calcite dissolvida. As linhas horizontais representam o índice de saturação obtido para as captações de Casal de Cadima, Olhos de Fervença, e Mealhada. ....	45

Figura 7.1 – Diagrama com as variações naturais de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para a água do oceano, vapor atmosférico e precipitação. O círculo negro representa o valor isotópico hipotético do vapor de água marinho em equilíbrio com a água do oceano, enquanto o quadrado negro possui valores de uma mais realista fraccionação de não equilíbrio (parcialmente cinético). O vapor marinho no equador condensa gradualmente em precipitação com valores isotópicos mais enriquecidos (fraccionação positiva), deixando para traz vapor progressivamente mais empobrecido (fraccionação negativa), adaptado de Mook, (2000).....	53
Figura 7.2– Representação dos processos que causam desvios aos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para a GMWL, adaptado de Geyh, (2000).....	54
Figura 7.3 – Projecção dos valores obtidos nas análises dos isótopos estáveis $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ ., RMP é a Recta Meteorica de Portugal., GMWL é a Recta Meteorica Global. ....	55
Figura 7.4 – Gráfico com a relação entre a altitude e $\delta^2\text{H}$ .....	56
Figura 7.5 - Gráfico com a relação entre a altitude e $\delta^2\text{H}$ . ....	57
Figura 8.1 – Piezometria e linhas de fluxo subterrâneo estimado por interpolação das cotas piezométricas medidas no Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, sobre carta altimétrica. ....	60
Figura 8.2 – Área delimitada para o cálculo da recarga no sector Oeste do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, com descarga na zona da nascente Olhos de Fervença.....	61

## Índice de Tabelas

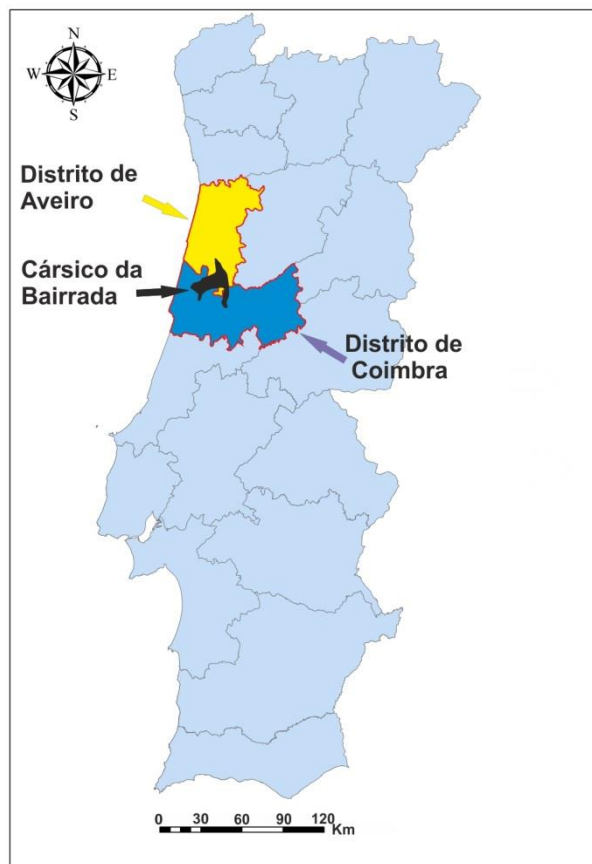
Tabela 4.1- Locais e data da amostragem de águas subterrâneas; estão representadas as coordenadas geográficas e o tipo de amostragem realizado: química = análise química de elementos maiores; $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ refere-se à amostra para determinação de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ ; $^3\text{H}$ a determinação do Trítio.....	25
Tabela 5.1– Tabela com a altimetria, profundidade dos furos, profundidade da água, e nível piezométrico, com as respectivas coordenadas e data da campanha para cada amostra. ....	26
Tabela 7.1 – Resultados analíticos para Trítio nas águas amostradas. ....	48
Tabela 7.2 – Idades aparentes calculadas com base no isótopo Trítio. ....	48

# 1 Introdução

A “Massa de Água Cársico da Bairrada” apresenta uma área aflorante de 316 km<sup>2</sup> que se distribui pelos distritos de Aveiro e Coimbra (Figura 1.1), e as bacias hidrográficas dos rios Vouga, Mondego, e Lis. Localiza-se a Norte do Mondego e a Sul do Vouga. Engloba parcialmente os concelhos de Anadia, Cantanhede, Coimbra, Mealhada, Montemor-O-Velho, Oliveira do Bairro e Penacova. Os concelhos de Anadia, Cantanhede e Coimbra são os que ocupam a maior parte da área em estudo (Figura 1.1).

A “Massa de Água Cársico da Bairrada” desenvolve-se essencialmente em rochas carbonatadas do Jurássico e Cretácico, possuindo características típicas de um aquífero cársico. Como é típico dos sistemas cársicos, apresenta uma heterogeneidade acentuada, caracterizando-se por apresentar elevada produtividade numas zonas e muito baixa noutras (Almeida *et al.*, 2000). Trata-se de um sistema muito vulnerável à contaminação e sobreexploração.

A “Massa de Água Cársico da Bairrada” é fortemente explorada para abastecimento público e privado (indústria e rega). No entanto, ainda pouco se sabe sobre o modelo conceptual do funcionamento do sistema aquífero. Nomeadamente sobre o volume dos recursos subterrâneos, as características físico-químicas da água ao longo do seu percurso, desde a infiltração às exurgências, as áreas de recarga dos aquíferos, bem como o seu desenvolvimento cársico.



**Figura 1.1** – Localização da Massa de Água Subterrânea Cársico da Bairrada.

## 1.1 Objectivos

Este trabalho de investigação tem como principal objectivo estudar a composição físico-química e isotópica da Massa de Água Subterrânea “Cársico da Bairrada”, para identificação dos processos hidrogeológicos e de fracionamento isotópico ocorrentes, e contribuir para a consolidação do modelo conceptual do modelo hidrológico existente (Almeida et al., 2000), permitindo assim um melhor conhecimento para o contributo de uma boa gestão e protecção dos recursos hídricos subterrâneos.

## 1.2 Metodologia

Para que se atinjam os objectivos propostos, o trabalho de investigação aqui apresentado segue a seguinte metodologia:

- Recolha de elementos bibliográficos sobre aquíferos cársicos e elementos de caracterização do Sistema Aquífero e da Massa de Água Subterrânea; obtenção de informação sobre captações de água subterrânea, escoamentos e climatologia, junto da Agência Portuguesa do Ambiente e Direcção de Região Hidrográfica do Centro;
- Inventariação de pontos de água, nascentes, poços, furos, e selecção de pontos de amostragem de água;
- Amostragem de águas em nascentes, poços e furos; realização de análises químicas de elementos maiores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) e determinações isotópicas das razões  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , bem como do isótopo radioactivo Trítio;
- Interpretação dos resultados de isótopos estáveis para estimar a área de recarga do sistema aquífero, identificar eventuais misturas de águas de diferentes origens e avaliar o grau de evaporação da água infiltrada, a qual poderá conduzir a uma estimativa da recarga; os dados de Trítio reportam idades das águas permitindo estimar a permeabilidade do sistema aquífero e apontar para graus de desenvolvimento cársico;
- Interpretação da composição química das águas e a sua variação entre a zona de recarga e de descarga (ao longo do escoamento subterrâneo), recorrendo ao estudo da interacção água-gás-rocha;
- Interpretação e discussão de todos os resultados obtidos e sua integração no modelo conceptual hidrogeológico do Sistema Aquífero “Cársico da Bairrada”.

## 2 Aquíferos Cársicos e sua Utilização em Portugal

Os aquíferos cársicos são caracterizados por cederem grandes volumes de água e são, em todo mundo, reservatórios de abastecimento de água às populações. Cerca de 20 a 25% da população mundial utiliza água proveniente deste tipo de aquíferos (Calçada, 2016). Em Portugal aquíferos cársicos têm igualmente sido utilizados para abastecimento público, como é o caso da região de Lisboa, da região Centro Litoral, Alentejo e Algarve. O abastecimento a Lisboa teve início com a construção do aqueduto das águas livres, transportando inicialmente água para a capital com origem nas nascentes do Vale de Carenque, que se situam a Noroeste de Lisboa a cerca de 10 km de distância. Posteriormente, o abastecimento foi reforçado com caudais captados em furos perto das nascentes cársicas de Ota e Alenquer. Outros concelhos como Condeixa-a-Nova, Alcobaca, Peniche, Pombal, Sousel, Borba, Estremoz, Cantanhede, são exemplos de populações abastecidas por aquíferos cársicos. Destaca-se o concelho de Cantanhede no qual está inserida a área em estudo. Na região do Algarve os aquíferos cársicos chegaram a contribuir com cerca de 80% de água para consumo humano (Peixinho de Cristo, 1988; Ramos *et al.*, 1988 in Calçada, 2016) tendo sido parcialmente substituída nos últimos anos por água superficial.

### 2.1 Circulação da Água em Aquíferos Cársicos

A paisagem cársica é tipicamente caracterizada por superfícies rochosas sulcadas por fendas mais ou menos alargadas designadas por lácias. Estes consistem em depressões fechadas com dimensões e formas variáveis, que podem ir desde dolinas, no qual possuem contornos simples e uma dimensão decamétrica a hectométrica, a contornos mais complexos de dimensão hectométrica (uvalas), e de dimensão quilométrica (Poljes), com grandes extensões de fundo plano, parcialmente coberto por sedimentos (Calçada, 2016).

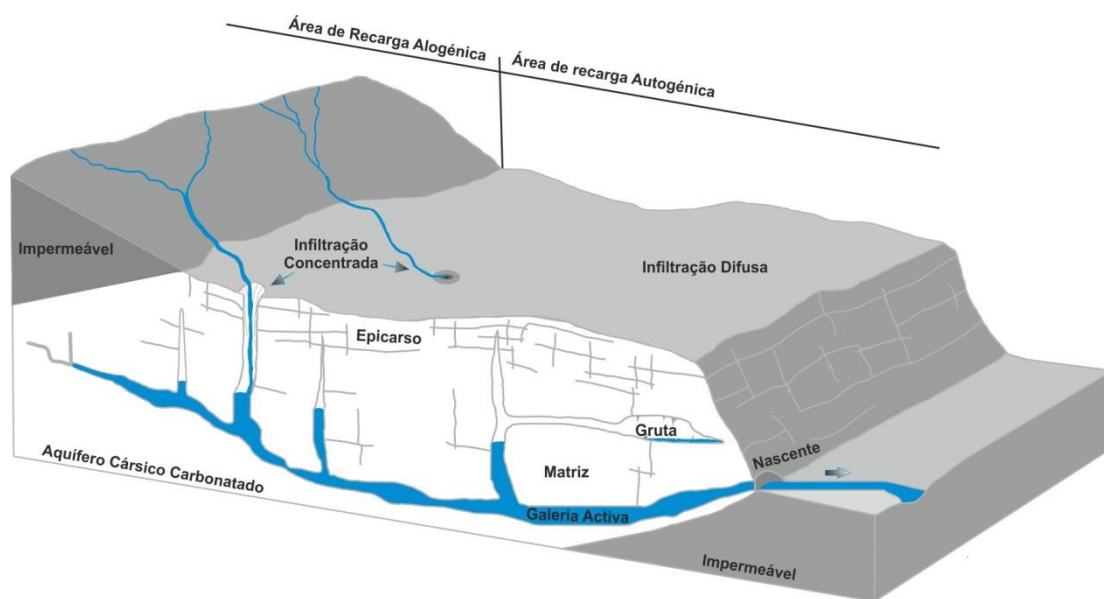
A água infiltrada nestas estruturas (lácias, uvalas, poljes), vai progredindo o seu processo de dissolução do maciço dando lugar à formação de grutas, no qual as entradas podem ser horizontais ou verticais sendo designadas por lapas e algares respectivamente. As grutas são constituídas por galerias, salas e poços, no qual a complexidade destas estruturas vai depender do grau de carsificação. Podem assim formar-se redes subterrâneas com desenvolvimentos que podem atingir dezenas de quilómetros (Figura 2.1). As águas infiltradas terminam o seu percurso em exurgências, normalmente com grandes caudais de ponta, podendo estas estar ou não associadas a redes subterrâneas. Quando rios com caudal permanente atingem estas regiões cársicas, estes podem escavar profundas gargantas com vertentes verticais (vales em canhão), e por vezes provocando o abatimento do tecto de grutas intersectadas (Calçada, 2016).

As rochas carbonatadas dão origem a aquíferos de porosidade dupla, primária e secundária, A permeabilidade secundária é tanto maior quanto maior o grau de carsificação das rochas e é formada por uma rede de colectores com permeabilidade elevada, mas com capacidade de armazenamento reduzida (galerias freáticas), no qual possui a função de transportar água através do maciço (Figura 2.1). A permeabilidade primária está associada aos blocos, normalmente baixa mas com uma capacidade de armazenamento considerável, devido a existência de várias fissuras e poros de pequenas dimensões (epicarso). Este meio tem assim a função de armazenar a água do maciço.

A água nos aquíferos carbonatados cársicos flui muito rapidamente, não se aplicando, em muitos casos, a Lei de Darcy ao fluxo. Desloca-se como nos rios, podendo o escoamento ser laminar ou turbulento, dependendo da sua velocidade. Nestes maciços, quando a carsificação é muito desenvolvida a água tende a entrar e sair rapidamente do sistema. Assim a quantidade de água é limitada, e os caudais das captações implementadas no sistema, normalmente variam sazonalmente, assim como os caudais das nascentes.

As particularidades dos aquíferos cársicos, representam alguns problemas na implementação de furos e captações. Dado que a carsificação nos maciços desenvolve-se anisotropicamente, esta particularidade vai representar um dos grandes problemas na exploração destes maciços, pois é normal termos um furo produtivo, enquanto outros implementados a uma curta distância, vão se encontrar completamente secos ou com baixos caudais. Este caso verifica-se para o Cársico da Bairrada, na região de Olhos de Fervença.

A Recarga dos aquíferos pode ser feita essencialmente de duas formas. Quando a água de precipitação cai directamente na superfície do aquífero, infiltrando-se, a recarga é autogénica. Já quando as águas de precipitação caem sobre uma superfície adjacente ao aquífero, sendo transportadas posteriormente pelo escoamento superficial até a sua área de recarga, a mesma é designada por recarga alogénica.



**Figura 2.1** - Esquema de um aquífero cársico, apresentando dois tipos de recarga (autogénica e alogénica), infiltração (concentrada e difusa) e formas de escoamento (galerias ou na matriz), adaptado de Goldscheider *et al.*, (2007 in Calçada, 2016).

## 2.2 Composição Química da Água de Aquíferos Cársicos

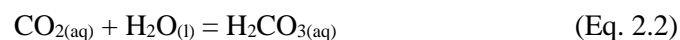
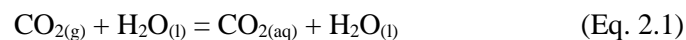
As rochas carbonatadas são as litologias dominantes dos aquíferos cársicos. A acção da água enriquecida em  $\text{CO}_2$ , dissolve a rocha através dos poros e fracturas por onde circula, dando origem ao fenómeno da carsificação. A porosidade e permeabilidade do sistema aumentam e desenvolvem-se, normalmente, de forma anisotrópica no maciço calcário.

A quantidade de rocha carbonatada que pode ser dissolvida depende de diversos factores, entre os quais a temperatura, a quantidade de precipitação, a composição mineralógica das rochas e a pressão de  $\text{CO}_{2(g)}$  a que a água está sujeita. Quando o calcário dissolvido não é puro, origina um resíduo argiloso de cor avermelhada, devido à presença de óxidos de ferro, que normalmente se acumula nas cavidades formadas pela dissolução, sendo este resíduo designado por “Terra Rossa”.

Por ordem de ocorrência decrescente os minerais constituintes das rochas carbonatadas são: calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), calcite magnesiana ( $\text{Ca}_{1-x}\text{Mg}_x\text{CO}_3$ , onde x é normalmente menor que 0,2), aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) e, por vezes, magnesite ( $\text{MgCO}_3$ ). A dissolução dos carbonatos é favorecida por águas frias nas regiões temperadas, implicando que a formação de aquíferos cársicos ocorra nas regiões de maior latitude, onde águas mais frias podem dissolver os maciços rochosos calcários conferindo-lhes maior permeabilidade.

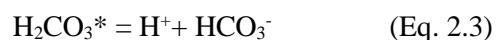
## 2.2.1 Dissolução de Carbonatos

O  $\text{CO}_{2(g)}$  é o principal responsável pela acidez das águas naturais (Langmuir, 1997) devido à formação de ácido carbónico como produto das suas reacções de dissolução [2.1 e 2.2]. A reacção de dissolução do  $\text{CO}_{2(g)}$  é exotérmica e a quantidade dissolvida está dependente da pressão parcial de  $\text{CO}_{2(g)}$  na atmosfera.



O ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) é um ácido mais forte do que o  $\text{CO}_{2(aq)}$ . Embora o  $\text{CO}_{2(aq)}$  aparentemente não seja um ácido, por não possuir protões para doar à água, o mesmo encontra-se rodeado de moléculas de água que têm protões disponíveis para doar ao sistema, conferindo assim em conjunto com o  $\text{CO}_2$  a acidez.

O conjunto do ácido carbónico  $\text{CO}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{CO}_3$  é representado por  $\text{H}_2\text{CO}_3^*$  (ácido carbónico composto). O  $\text{H}_2\text{CO}_3^*$  dissolve-se na água para formar o ião bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) pela seguinte reacção de dissociação [2.3]:

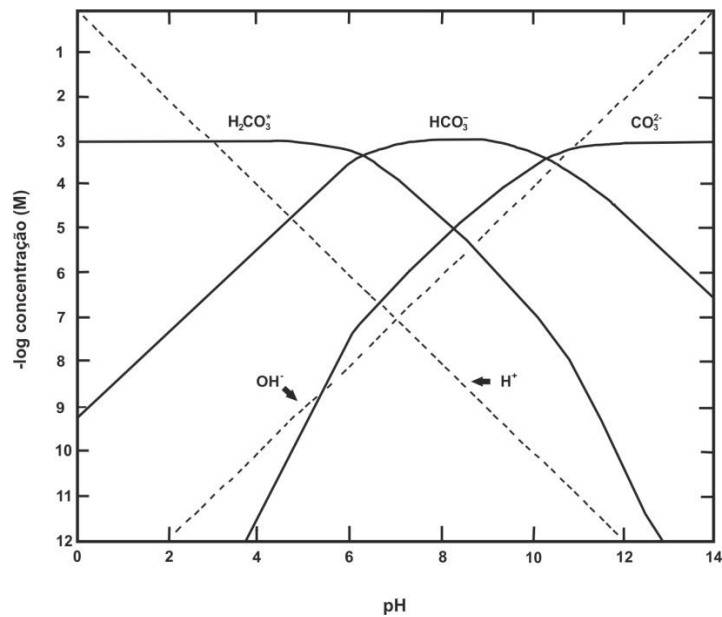


No qual, dependendo do pH da água, o bicarbonato se dissocia na água para formar o ião carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) pela equação [2.4]:



As concentrações relativas das diferentes espécies de carbono ( $\text{CO}_{2(g)}$ ,  $\text{CO}_{2(aq)}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) estão dependentes da actividade do  $\text{H}^+$  (expressa pelo pH que corresponde ao logaritmo negativo da actividade do ião  $\text{H}^+$ ), da temperatura e das constantes de equilíbrio termodinâmico (K) que regem as equações de dissolução e dissociação das espécies de carbono. A 25°C as constantes de equilíbrio das reacções [2.1, 2.2, 2.3 e 2.4] são,  $K=10^{-1,468}$ ,  $K=10^{-1,47}$ ,  $K=10^{-6,35}$ ,  $K=10^{-10,33}$ , respectivamente. Na Figura 2.2 está representada a relação entre as espécies de carbono dissolvidas e o pH da água, à temperatura de 25°C. Por exemplo, numa água com pH de 6,35, a 25 °C, 50% das espécies de carbono estão sob a forma de ácido carbónico e 50% sob a de bicarbonato. Já a pH de 9, o ião bicarbonato

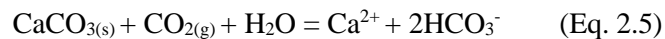
representa 95,28 % e o carbonato cerca de 4,5% das espécies, estando o ácido carbónico praticamente ausente (0,22%). A maioria das águas naturais tem pH entre 4 e 9, estando as espécies de carbono essencialmente representadas pelo ácido carbónico e pelo ião bicarbonato. O ião carbonato só existe em concentrações significativas em águas muito alcalinas (Langmuir, 1997).



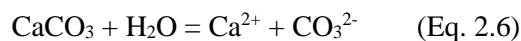
**Figura 2.2** – Representação gráfica da variação da concentração das espécies carbonatadas em função do pH a 25C°, assumindo C<sub>T</sub>=10<sup>-3</sup> (Carbono total). As linhas a tracejado representam as concentrações de H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>, independentes de C<sub>T</sub>, adaptado de Langmuir, (1997).

A concentração de CO<sub>2(g)</sub> é essencialmente controlada pela sua produção na zona não saturada dos solos, no horizonte A, através da respiração das raízes das plantas, e por decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Este gás tem tendência a descer através do solo, por ser mais denso que o N<sub>2</sub> e o O<sub>2</sub>, mas nos meses quentes tem também tendência a sair para a atmosfera (Langmuir, 1997). As águas subterrâneas pouco profundas têm normalmente mais CO<sub>2(g)</sub>, que as águas superficiais que só contactam com o CO<sub>2(g)</sub> da atmosfera.

A solubilidade da calcite é favorecida pela acidez da água e por consequência pela concentração do CO<sub>2(g)</sub>, sendo descrita como [2.5]:



Esta reacção pode ser dividida nas duas semi-reacções [2.6] e [2.7]:

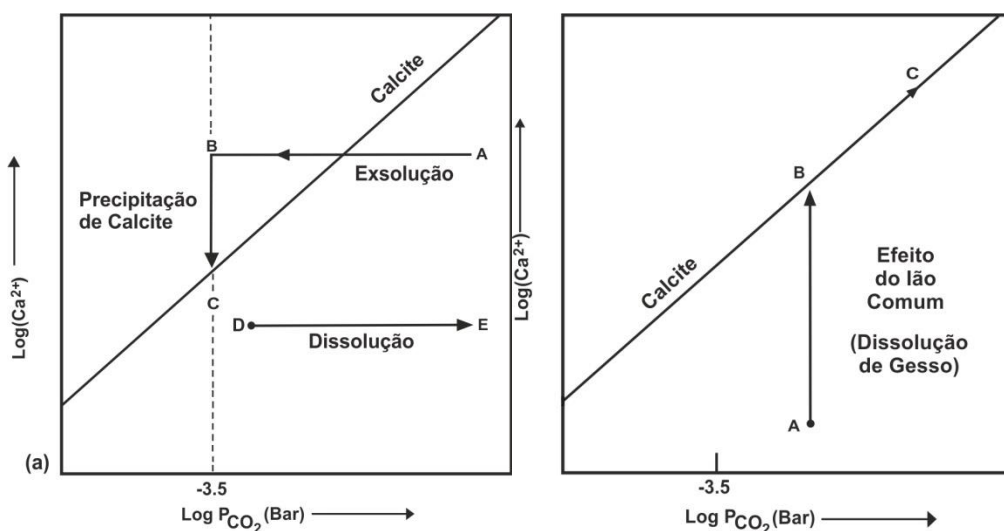


O facto do CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> se ligar ao H<sup>+</sup> para formar HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> desequilibra a reacção de dissolução da calcite provocando maior dissolução para reequilíbrio dos produtos da reacção.

A dissolução de calcite, assim como outros carbonatos, é favorecida por um aumento da pressão de CO<sub>2</sub> e/ou um decréscimo no pH, e a sua precipitação por perda de CO<sub>2</sub> e/ou aumento do pH. As águas superficiais têm tendência para ganhar CO<sub>2</sub> quando se infiltram nos solos, tornando a água menos saturada em relação á calcite (Langmuir, 1997). No entanto, quando a água subterrânea é descarregada

para rios e grutas (em aquíferos cársicos), o CO<sub>2</sub> normalmente é exsolvido para a atmosfera o que pode levar a uma precipitação de calcite. Pelo facto de um gás entrar na reacção de dissolução da calcite o aumento de temperatura da água reduz a sua solubilidade e pode provocar a sua precipitação. Pode-se verificar na Figura 2.3a como a variação do CO<sub>2</sub> altera a solubilidade da calcite. Uma redução de CO<sub>2</sub> (Segmento A-B), projecta a água no campo acima da linha da calcite, resultando na precipitação deste mineral (Segmento B-C). Já um aumento de CO<sub>2</sub> provoca um aumento da dissolução (Segmento D-E).

A dissolução de outros minerais que coloque em solução espécies como o bicarbonato, carbonato e cálcio contribui para o efeito de ião comum, dando origem à sobressaturação da água em relação à calcite (Langmuir,1997), provocando a sua precipitação. Por exemplo, a dissolução sequencial de calcite e gesso pode tornar uma água em equilíbrio com a calcite, sobressaturada e precipitar calcite. A reacção que mostra a interferência da dissolução no gesso no equilíbrio da água em relação à calcite é expressa por:



**Figura 2.3** – Descrição esquemática da solubilidade da calcite em águas naturais. As águas estão saturadas em calcite acima e à esquerda da linha da calcite, e subsaturadas em calcite, abaixo e a direita da linha da calcite, adaptado de Langmuir, (1997).

É possível verificar que inicialmente a dissolução do gesso apenas provoca um aumento do cálcio (segmento A-B; Figura 2.3b). Isto acontece porque a água ainda não atingiu a linha de saturação da calcite relativamente ao cálcio. Quando a linha de saturação é interceptada, inicia-se a precipitação de calcite pela equação anterior e a produção de CO<sub>2</sub>, no qual provoca a subida ao longo da curva de saturação como se pode verificar no segmento B-C (Figura 2.3b).

A mistura de águas pode também conduzir à sobressaturação de uma água em calcite e consequente precipitação, assim como à sua subsaturação.

Outro factor que influencia a solubilidade é a força iónica (I). Para espécies moleculares neutras em solução (como o CO<sub>2</sub>, por exemplo) o coeficiente de actividade ( $\gamma_i$ ) aumenta com o aumento da força iónica. Tendo em conta que as actividades dos compostos dissolvidos são dadas por:

$$a_i = \gamma_i \cdot m_i \quad (\text{Eq. 2.9})$$

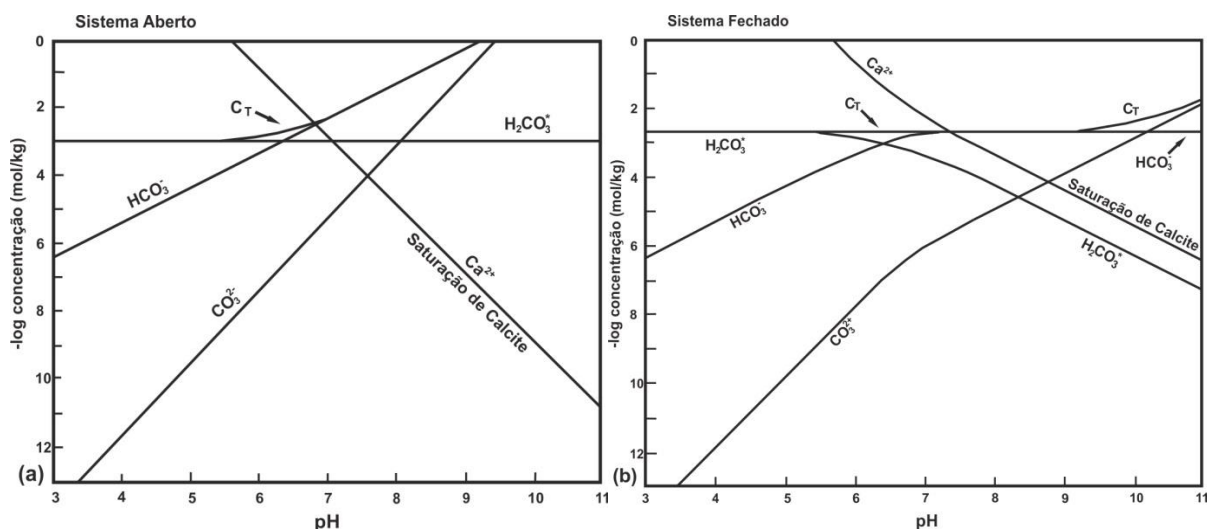
Em que  $a_i$  corresponde à actividade da espécie  $i$  e  $m_i$  à concentração da espécie  $i$ . A actividade é normalmente fixa em sistemas que se encontram em equilíbrio químico. Por isso um aumento das espécies iónicas em solução vai provocar um aumento de  $\gamma_i$ , no qual irá provocar uma redução de  $m_i$ , ou seja uma redução da solubilidade. Para o  $\text{CO}_2$  de um sistema aquoso com pressão parcial fixa, este efeito provocará uma exsolução do mesmo por este ser um volátil. Para outras espécies moleculares neutras como o  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  (ácido silícico) resultante da dissolução do mineral quartzo, este aumento de  $\gamma_i$  provocará precipitação de sílica. Este efeito em espécies moleculares neutras é denominado como “Salting out”.

Já quando se considera espécies iónicas individuais, e igualmente para um sistema em equilíbrio com actividade fixa, um aumento da força iónica, provocará uma descida de  $\gamma_i$ , que levará a um aumento de  $m_i$ , provocando um aumento da solubilidade. A sua solubilidade vai aumentar com o aumento da força iónica. Este efeito contrário ao anterior, é denominado de “Salted in” (Langmuir, 1997).

## 2.2.2 Dissolução em Sistema Aberto e Sistema Fechado

A dissolução de carbonatos em sistema aberto ocorre quando a pressão de  $\text{CO}_2$  se mantém constante. Para que tal condição ocorra é necessário que as águas subterrâneas estejam em contacto com uma fonte de  $\text{CO}_{2(g)}$  de grandes dimensões, como a atmosfera em contacto com as águas superficiais; ou com a fase gasosa presente em solos permeáveis que contactam com as águas subterrâneas; ou através de formações permeáveis como arenitos e rochas carbonatadas com sistemas de canais e cavernas. Nestes sistemas em que a pressão de  $\text{CO}_{2(g)}$  é fixa, o ácido carbónico presente também é fixo ( $\text{H}_2\text{CO}_3^*$ ) (Langmuir, 1997). A dissolução dos carbonatos provoca a subida do pH que é contrariada pela reposição do  $\text{CO}_{2(g)}$ . A manutenção do pH baixo em sistemas abertos mantém as águas subsaturadas em carbonatos, resultando águas bicarbonatadas cálcicas ou calco-magnesianas, com pH perto da neutralidade (dependendo da  $P_{\text{CO}_2}$ ) e muito mineralizadas.

A dissolução de carbonatos em sistema fechado ocorre quando a água não volta a contactar com uma fase gasosa com  $\text{CO}_{2(g)}$ , depois de se infiltrar. Os sistemas fechados apresentam uma quantidade inicial de  $\text{CO}_{2(g)}$  ( $\text{H}_2\text{CO}_3^*$ ) dissolvido na água, e o mesmo não é repostado à medida que é consumido pela dissolução dos carbonatos (Langmuir, 1997). Com o decorrer da dissolução, o pH e a concentração dos iões bicarbonato e carbonatado aumentam na solução, enquanto o ácido carbónico diminui. A subida do pH e aumento da concentrações dos iões carbonatos promovem a sobressaturação da água em relação as fases carbonatadas (Figura 2.4), impedindo que a dissolução dos carbonatos seja continuada e resultando águas bicarbonatadas cálcicas ou calco-magnesianas, com pH elevado e menos mineralizadas.



**Figura 2.4** - Concentrações de  $C_T$  (Carbono total) e de espécies carbonatadas em função do pH, para a dissolução de calcite a 25 C°, a pressão total de 1 bar para sistemas abertos (a) e fechados (b). A pressão de  $CO_2$  é assumida como constante a  $10^{-1.5}$  bar para os sistemas abertos, no qual corresponde à actividade de  $10^{-3.0}$  mol/kg de  $H_2CO_3^*$ . Para o sistema fechado a pressão inicial de  $H_2CO_3^*$  é de  $10^{-3.0}$  mol/kg a pH=3. Em ambos os diagramas encontra-se representada a curva de saturação da calcite com as respectivas concentrações em  $Ca^{2+}$ , adaptado de Langmuir, (1997).

A maioria das águas subterrâneas evolui em condições que passam por um sistema aberto e fechado. Nos pontos de recarga e de descarga o sistema é aberto, mas durante o seu percurso entre os dois pontos pode ser fechado. Podem também ocorrer misturas de águas de sistemas abertos com águas de sistemas fechados. Por isso a água de uma nascente ou um poço, pode apresentar uma composição química resultante de fluir por vários sistemas abertos e fechados (Langmuir,1997).

### 3 Sistema Aquífero Cársico da Bairrada

#### 3.1 Caracterização Climática

Tendo em conta que a bacia Hidrográfica do Vouga e a sua sub-bacia do Lis, cobrem a maior parte da área do sistema aquífero Cársico da Bairrada, o clima da região será caracterizado mais detalhadamente considerando os dados climáticos desta mesma bacia apresentados no Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (RH4) (APA, 2016), e no Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego, e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4 (ARH, 2012). Serão também utilizados dados da evapotranspiração potencial e do vento para melhor caracterizar as bacias.

Da análise dos dados, verifica-se que os valores médios mensais da precipitação na bacia hidrográfica do Vouga são superiores ao da bacia do Lis. O valor da precipitação média mensal (entre 2009 e 2015) no semestre seco é muito reduzido, com os valores mínimos nos meses entre Maio e Setembro para a bacia do Vouga, e entre os meses de Maio e Outubro para a bacia do Lis. Para a bacia do Vouga e bacia de Lis os valores médios anuais são de 1301 e 988 mm respectivamente.

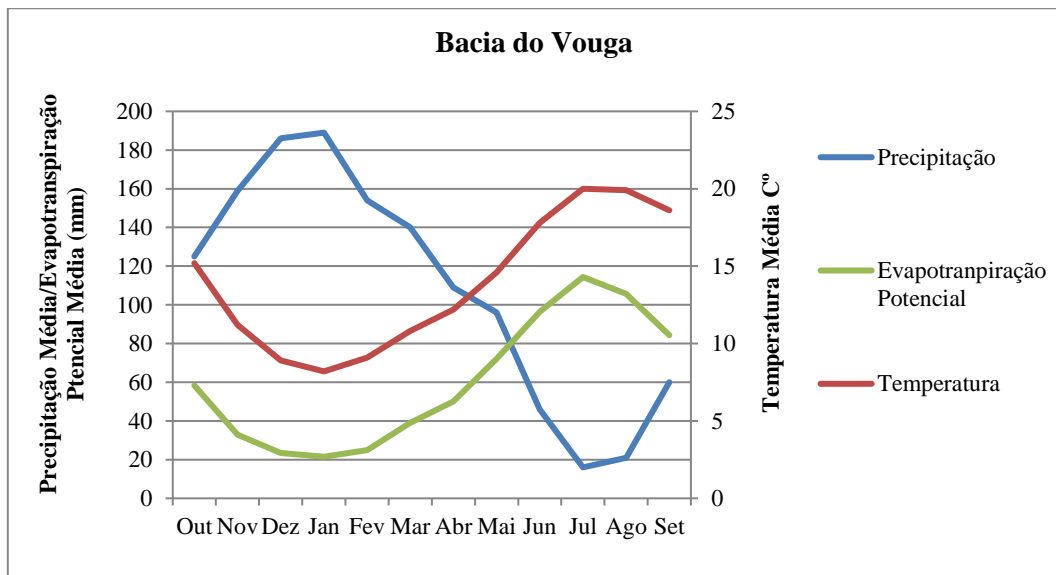
As temperaturas médias mensais (entre 1961 a 1990 para um conjunto de estações, e 1970 a 2000 para outro conjunto de estações) para ambas as bacias no semestre seco, são superiores às do semestre

húmido, sendo o valor máximo atingido nos meses de Julho e Agosto, e os valores mínimos em Dezembro e Janeiro. É possível verificar que a amplitude das temperaturas entre o mínimo e o máximo, são muito mais baixas na sub-bacia de Lis.

A temperatura média anual na bacia do Vouga é de 13.9 °C, e na bacia de Lis é de 14.6 °C.

É possível verificar que os valores mais baixos de evapotranspiração potencial média mensal (entre 1961 a 1990 para um conjunto de estações, e 1970 a 2000 para outro conjunto de estações) ocorrem no mês de Janeiro, com 25,4 mm para a sub-bacia Lis, e 21,5 mm na bacia do Vouga. Já a evapotranspiração potencial média apresenta um valor máximo de 108,2 mm para Lis, e de 114,4 mm para a bacia do Vouga, sempre no mês de Julho. O valor médio da evapotranspiração potencial anual situa-se nos 737,1 mm para a sub-bacia Lis, e para a bacia do Vouga nos 723,0 mm.

Os dados de precipitação, temperatura, e evapotranspiração potencial, podem ser visualizados conjuntamente, para cada bacia hidrográfica nas Figura 3.1 e 3.2.



**Figura 3.1** – Gráfico com precipitação média, temperatura média, e evapotranspiração potencial média para a bacia do Vouga.

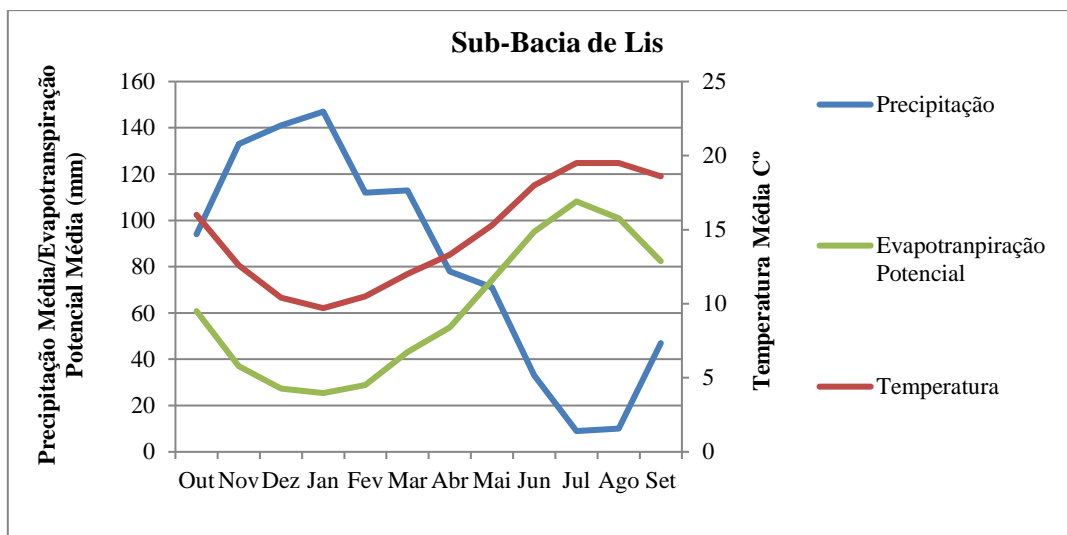


Figura 3.2 – Gráfico com precipitação média, temperatura média, e evapotranspiração potencial média para a bacia de Lis.

A velocidade média mensal ponderada do vento (entre 1961 a 1990 para um conjunto de estações, e 1970 a 2000 para outro conjunto de estações), varia entre 7,2 e 13,5 km/h na sub-bacia de Lis, e na bacia do Vouga situa-se entre 5,1 e 12,4 km/h (estação de Coimbra). A maior velocidade média mensal tem rumo Este. Relativamente as frequências por rumo, permanecem os rumos de Noroeste e do quadrante Sudeste (Figura 3.3).

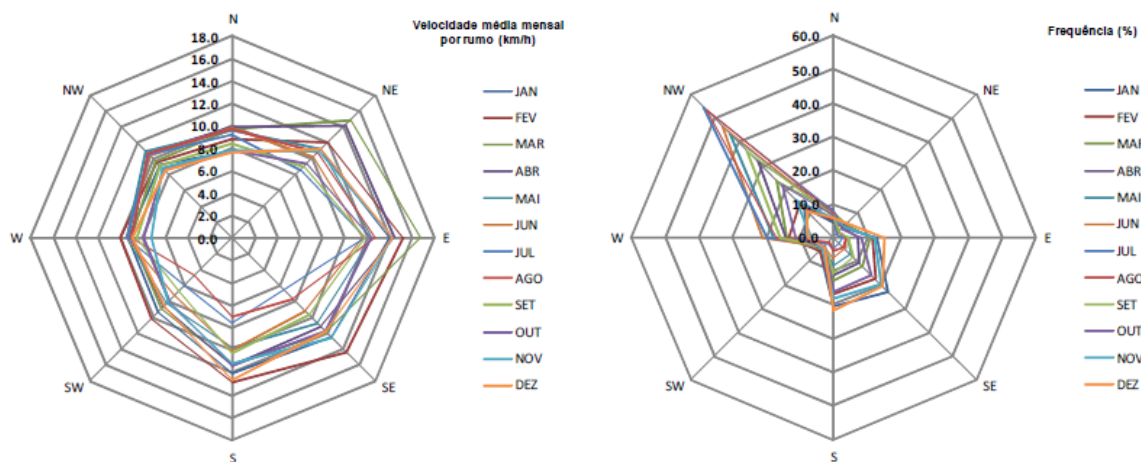


Figura 3.3 – Gráficos da velocidade média do vento e frequência por rumo para a estação de Coimbra, in ARH (2012).

### 3.2 Enquadramento Geológico

Na área em estudo ocorrem formações do Triássico (arenitos), Jurássico inferior e médio (calcários), Cretácico inferior e superior (calcários, arenitos e argilas), Pliocénico (complexo arenoso), depósitos de terraço do Quaternário e aluviões recentes (Figura 3.4). De todas estas formações a que possui mais interesse hidrológico são as Camadas de Coimbra e os Calcários Margosos de Lemed. São as camadas mais produtivas e estão separadas pelas margas e calcários margosos de Vale das Fontes, tendo estas um comportamento de aquífero (Almeida *et al.*, 2000).

O Sistema Aquífero Cárstico da Bairrada está delimitado na Carta Geológica de Portugal, à escala 1/50 000, Folha 19 - A Cantanhede (Barbosa *et al.*, 1988) e Folha 16-C Vagos (Barbosa, 1981) (Figura 3.5) desenvolve-se em formações do Jurássico inferior que a seguir se descrevem:

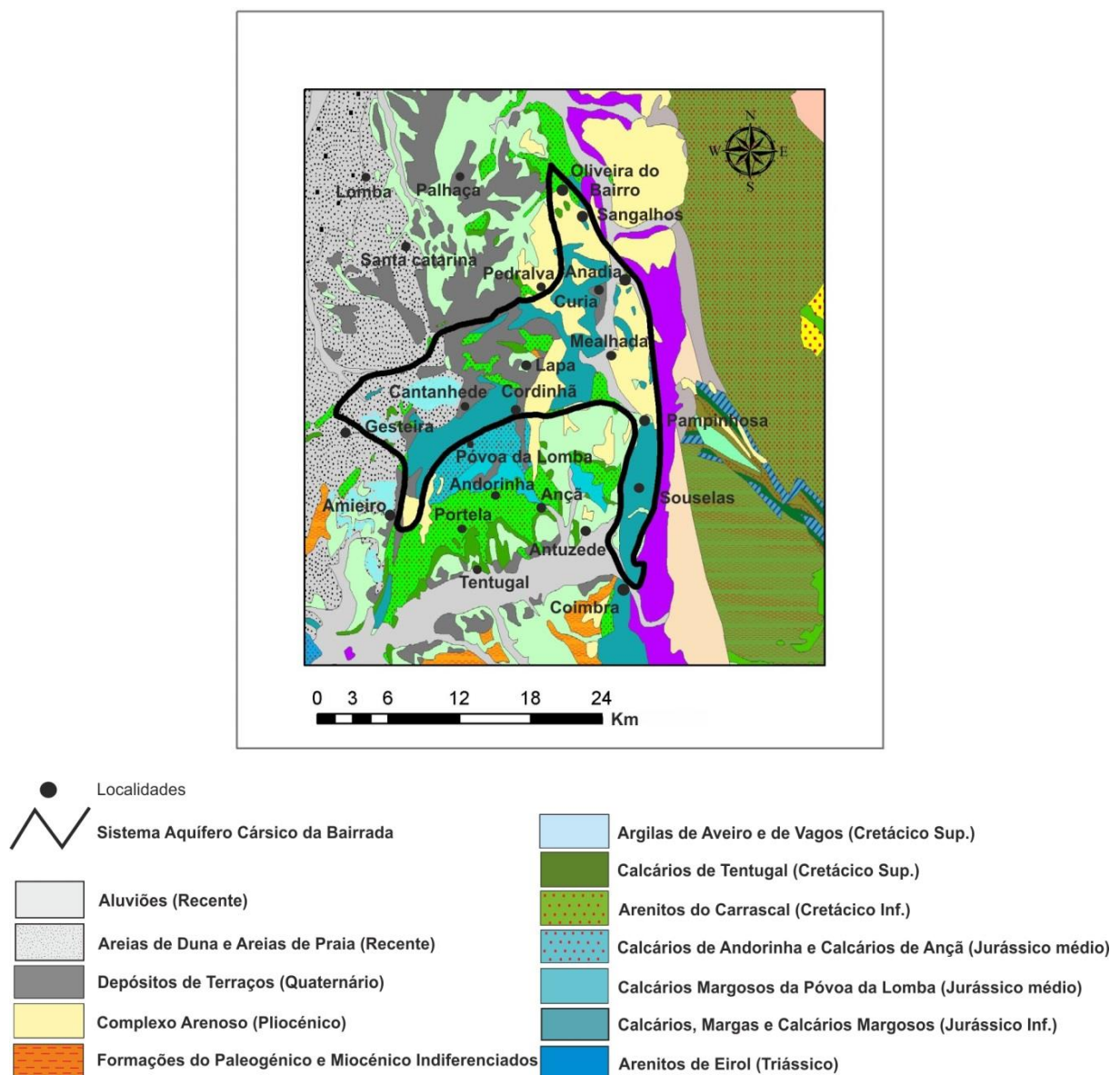


Figura 3.4 – Enquadramento Geológico da Massa de Água “Cárstico da Bairrada”, adaptado de Almeida *et al.*, (2000).

**J<sup>1</sup> cd Camadas de Coimbra - 110 m - Sinemuriano – Lotaringiano** – Esta unidade é essencialmente carbonatada. A parte inferior tem cerca de 70 metros de espessura e corresponde a uma série de calcários cinzentos compactos em bancos espessos com uma inclinação de 20° a 25° Sul. Associações de fósseis como “Terebrátula” e pequenos ostreídeos no terço superior da série permite datá-la do Lotaringiano inferior a médio e, possivelmente, da base do Lotaringiano superior (Barbosa *et al.*, 1988).

A parte superior das Camadas de Coimbra com uma espessura que pode ir dos 40 aos 45 metros, foi dividida em três conjuntos litológicos principais:

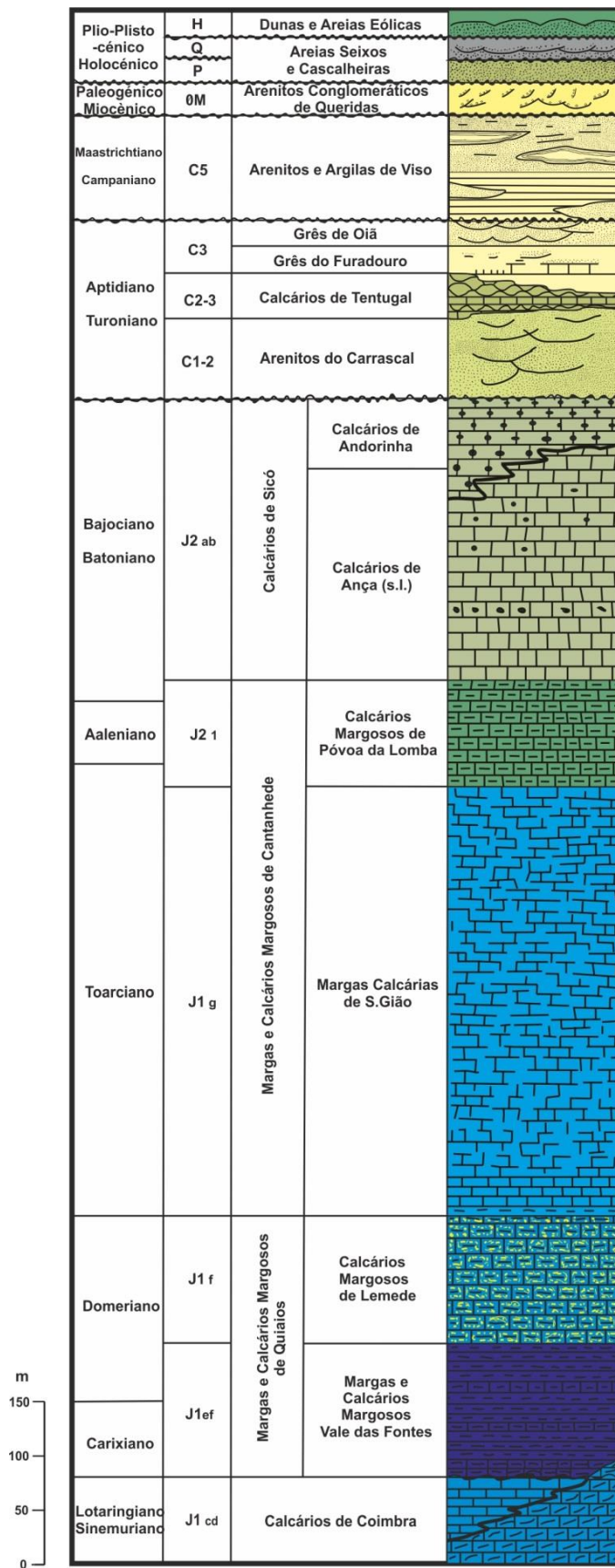
1 – A sua base tem cerca de 15 a 20 metros existindo alternância de camadas compactas ou ligeiramente argilosas e margas xistosas com espessura média;

2 – Na zona média ocorrem alternâncias de camadas de calcários margosos e margas xistosas, com alguns níveis betuminosos com cerca de 17,5 metros de espessura;

3 – A parte superior desta unidade termina com bancos espessos de calcário compacto alternando com pequenos leitos margosos com cerca de 8 metros de espessura.

A NW de Cantanhede existem vários afloramentos desta unidade. São pequenos afloramentos de calcário dolomitizado que se encontram a aflorar devido ao jogo estrutural dos diferentes blocos ao longo das falhas de Arunca – Montemor (N-S) e a Vala da Vela (E-W).

Esta é a unidade mais produtiva do Jurássico inferior, pelo principal motivo de se encontrar carsificada, na qual ocorrem algumas cavernas de dimensão considerável. Regista-se nestas cavernas algumas zonas de exurgência onde ocorre descarga natural do sistema. A zona de exurgência de Arcos é um exemplo destes pontos de descarga.



**Figura 3.5** - Coluna litoestratigráfica geral da zona de estudo, adaptado de Barbosa *et al.*, (1988).

**J<sup>1</sup> ef – Margas e Calcários Margosos de Vale das Fontes- 17 – 75 m – Carixiano – Domeriano inferior** – O conjunto destas unidades consiste numa alternância de margas e calcários margosos, com desenvolvimento local de bancadas de calcários compactos com pouca espessura e de margas xistosas.

Um perfil representativo desta unidade situa-se na região de Quiaios e Vale das Fontes. É assim possível observar da base para o topo as seguintes camadas:

1- Uma série de camadas essencialmente margosas com pequenos bancos de calcário margoso com 8 a 9 metros de espessura, com presença de fauna abundante constituída por amonites crinóides e raros braquiópodes;

2 - Uma 2<sup>a</sup> série com calcários compactos, mais ou menos margosos e espessos, separados por margas azuladas. Tem uma fauna constituída na sua maioria por amonites;

3 - Uma série de margas xistosas alternando com bancos de calcário margoso;

4 – Uma série de camadas de calcários margosos compactos separados por pequenas camadas de margas com cerca de 20 a 25 metros de espessura. A presença de fauna é rara.

As características desta unidade associadas à sua espessura, permitem classificar esta unidade como um aquitardo, fazendo a separação entre as Camadas de Coimbra e os Calcários de Lemedé. Não apresentam aparentemente condições para que ocorra transmissão de recarga, por drenância, entre as duas unidades.

**J<sup>1</sup> f – Calcários Margosos de Lemedé, 50 m – Domeriano Médio Superior** – Esta unidade é composta por calcários argilosos, bastante compactos, cinzento-amarelados ou esbranquiçados com uma espessura de 0,20 a 0,50 metros, estando alternada com finas camadas de margas mais desenvolvidas na base da unidade. Ocorrem fenómenos de carsificação no qual estão na base da produtividade exibida por esta unidade. A sua espessura é variável, de 40 a 45 metros em Vale das Fontes, e atinge cerca de 50 metros em Cantanhede.

**J<sup>1</sup> g - Margas Calcárias de S. Gião, 300 m – Toarciano** – Esta unidade é composta por calcários margosos, margas, calcários compactos, calcários margosos nodulares ou compactos, com níveis margosos alternando com margas cinzentas, e margas com intercalações de camadas finas de calcário margoso. Esta unidade tem uma função hidrológica importante, pois constitui um tecto impermeável para o sistema, atribuindo características de confinamento. Esta característica serve de protecção natural para as unidades produtivas do Jurássico, dificultando ou mesmo impedindo a entrada de contaminações.

**J<sup>2</sup> 1 – Calcários Margosos da Pova da Lomba, 100±20m – Toarciano Superior – Bajociano inferior** – São constituídos por alternâncias de calcários margosos mais ou menos compactos, com 0,10 a 0,30 metros de espessura, com margas com uma espessura de 10 a 40 metros. Estas camadas estão representadas somente no bordo Sul do anticlinal de Cantanhede no lado Este. A sequência margo calcária termina nesta unidade.

### 3.3 Geomorfologia

Geomorfologicamente a área de estudo é essencialmente aplanada encontrando-se a baixa altitude, sendo a maior elevação da ordem dos 100 metros (Figura 3.6). Esta superfície mais elevada corresponde a aplanamentos do Plistocénico e dá origem ao extenso planalto do Jurássico de Cantanhede – Ançã e ainda às plataformas Plio-pleistocénicas de Murtede - Cordinhã e de Gordos – Meco.

Existe um segundo grande aplanamento, com início e continuidade no Quaternário. Podem ser observados como testemunhos deste aplanamento, os depósitos de areias Arazedo e Cantanhede. As cotas nesta zona vão de 50 a 90 metros e ligam em declive suave e contínuo à linha de costa, o planalto Plio-Pleistocénico (Barbosa *et al.*, 1988).

Ao longo do contacto entre as margas calcárias de S. Gião, e os calcários margosos da Póvoa da Lomba, a erosão diferencial define uma pequena costeira decorrente do arco estrutural. Nas margas instala-se uma rede de drenagem muito pouco incisiva, do tipo subsequente e obsequente, subsidiário das ribeiras de Pocariça e de Cantanhede, com direcções aparentemente de fractura.

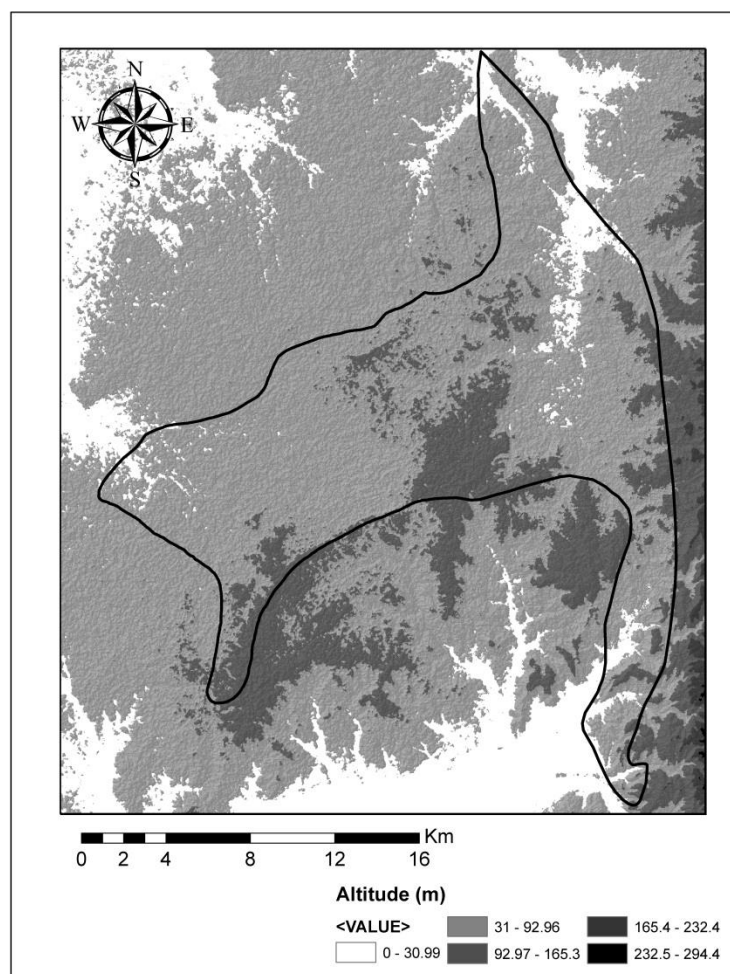


Figura 3.6 – Mapa geomorfológico da Massa de Água Cárstica da Bairrada.

A rede de drenagem sobre os calcários margosos da Póvoa da Lomba e os calcários de Ançã e da Andorinha é incisiva, de tipo subsequente (Barbosa *et al.*, 1988).

Os calcários da Ançã apresentam uma carsificação superficial seca, localmente penetrativa até aproximadamente 10 metros. Já nos calcários da Andorinha pode-se observar um carso evoluído com preenchimento argiloso.

O Cretácico na cota dos 100 metros define, para Sul de Andorinha, basculamento flexural para o vale do Mondego. Na zona de cotas mais baixas, instalam-se terraços do Rio Mondego. Na zona do Mondego, no Cretácico, a rede de drenagem é do tipo dendrítico.

Na zona Norte, as ribeiras de Varziela e Corujeira, e seus subsidiários, convergem para a lagoa de Mira, com uma aparente dependência do declive regional.

Já na zona Sul na região de Viso – Gatões, o escoamento superficial orienta-se principalmente para o quadrante NW.

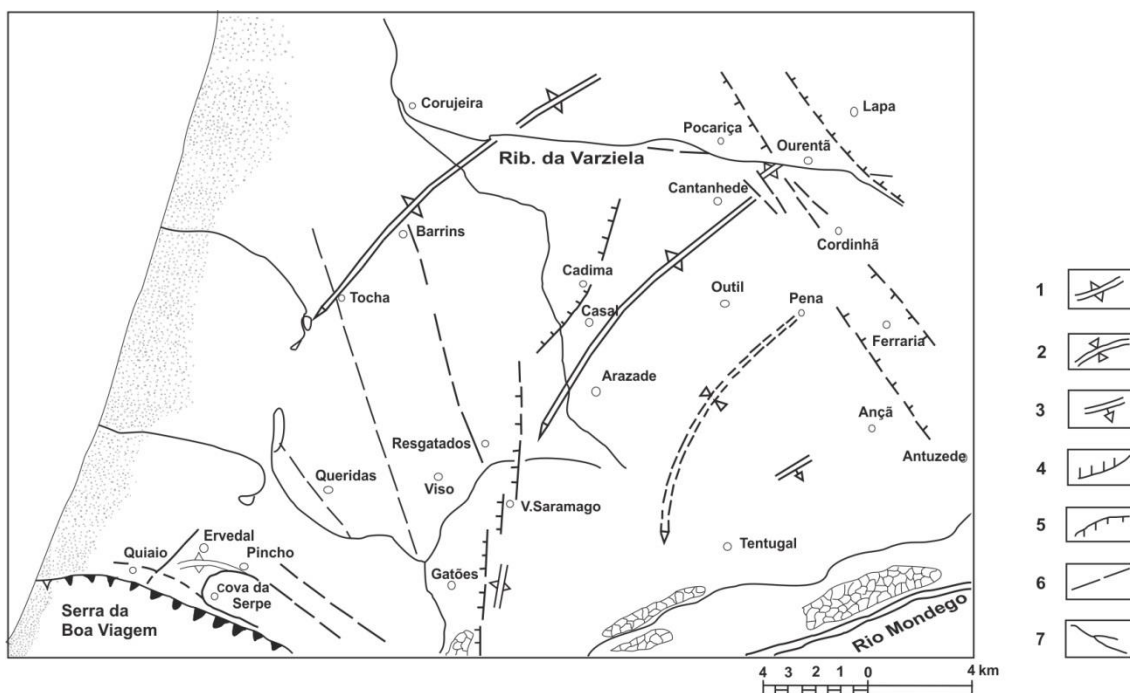
Na zona litoral instala-se uma rede de drenagem partitamente rectilínea (E-W), sobre o manto eólico, de circulação apenas invernal controlada por valas que drenam as lagoas (Barbosa *et al.*, 1988).

### **3.4 Tectónica**

Na área abrangida pela massa de água, o Horst de Cantanhede é a principal estrutura a destacar-se, embora os seus limites não estejam bem definidos. Representa uma sub-elevação que separa as duas bacias hidrográficas do Mondego, a Sul, e do Vouga, a Norte, com uma orientação geral de NE-SW.

É possível observar na zona Norte do sistema aquífero a presença do anticlinal de Mogofores – Febres - Tocha, no qual se caracteriza por ter uma orientação praticamente paralela ao anticlinal de Cantanhede.

As principais falhas localizam-se na Pocariça – Ferraria no qual estão associadas ao Graben de Antuzede com uma orientação NW – SE (Figura 3.7).



1 – Anticlinal 2 – Sinclinal 3 – Flexura 4 – Falha Normal 5 – Falha inversa/cavalgante 6 – Lineamento 7 – Linhas de água

**Figura 3.7** - Esboço estrutural da zona de estudo. A massa de Água Cársico da Bairrada localiza-se nas zonas de Cantanhede Ourentã e Lapa, adaptado de Barbosa *et al.*, (1988).

É possível também observar fracturação na direcção N-S, estando representada desde Gatões e Saramago, até a região de Mamarrosa – Palhaça sendo a causa de uma depressão observada a Oeste, da Bacia de Viso – Queridas (Almeida *et al.*, 2000).

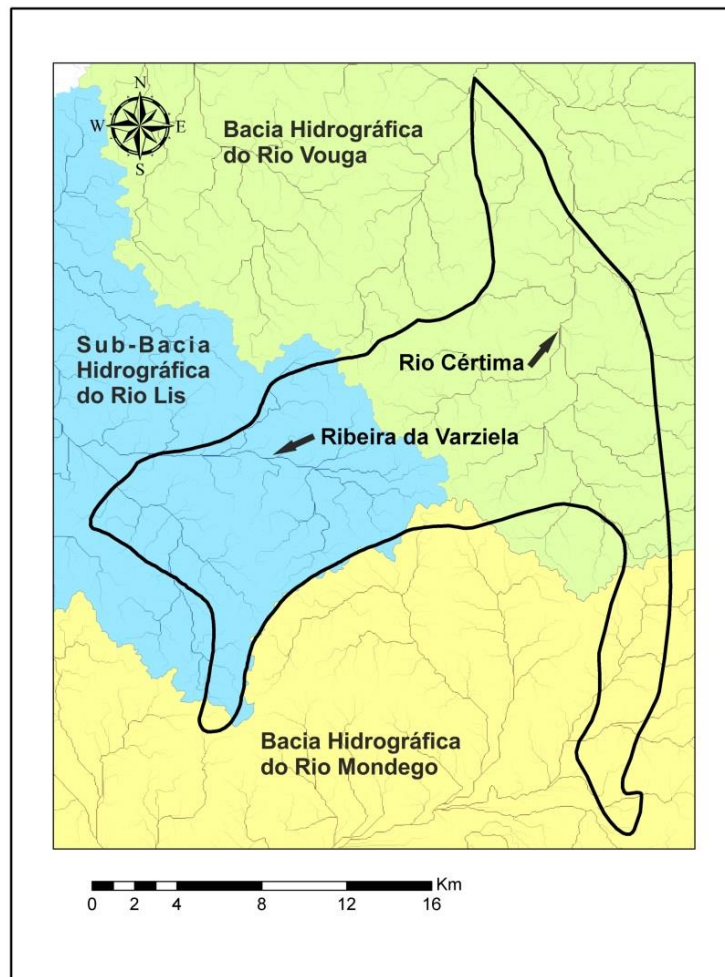
Deve-se ter em consideração a disposição das falhas nas proximidades da nascente dos Olhos de Fervença, no qual fazem parte de uma família com uma direcção estrutural diferente das restantes estruturas (W-E), no qual aparenta condicionar as formações Jurássicas a Norte do Mondego. As falhas têm direcções N59,5°E e N51°W são praticamente paralelas entre si, e podem de alguma forma afectar o aquífero, sendo provável que esta estrutura tenha incidência na parte do sistema que é drenado pela exsurgência de Olhos de Fervença.

### 3.5 Hidrologia e Hidrogeologia

O Sistema Aquífero Cársico da Bairrada distribui-se por três bacias hidrográficas Vouga, Mondego e Lis.

O rio Vouga nasce na Serra da Lapa a aproximadamente 930 metros de altitude, percorrendo 930 km até desaguar na Barra de Aveiro. A sua bacia hidrográfica é limitada a Sul pela serra do Buçaco que separa a bacia do rio Mondego, e limitada a Norte pelas Serras Leomil, Montemuro, Lapa e Serra de Freita. A última separa a bacia do rio Douro. A mesma não é constituída por um rio principal bem diferenciado com os respectivos afluentes, tratando-se de um conjunto hidrográfico de rios que

desaguam muito perto da foz do Vouga, numa laguna que comunica com o mar, correspondendo a ria de Aveiro.



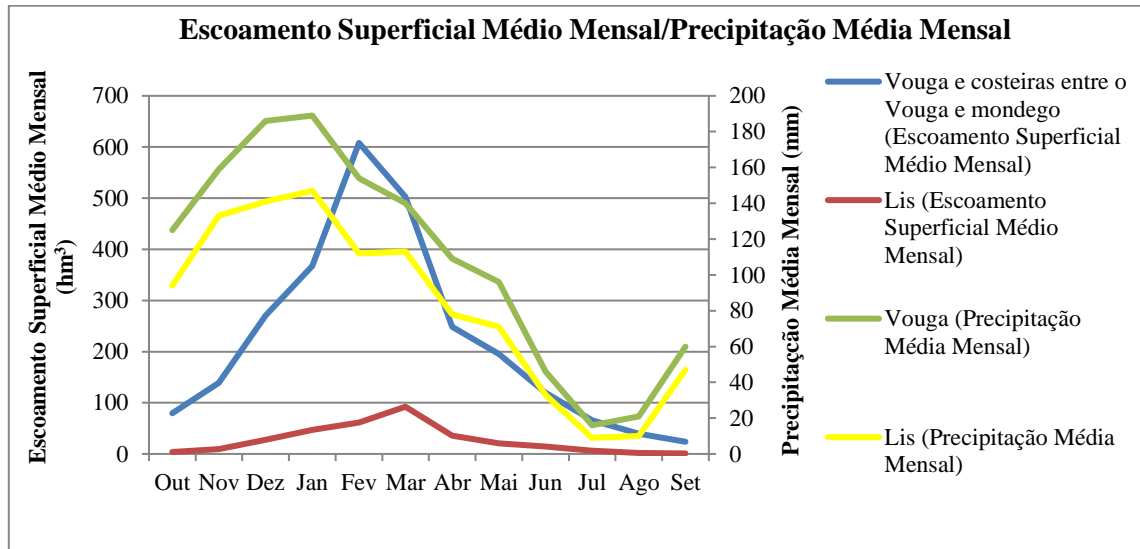
**Figura 3.8** – Bacias hidrográficas e suas respectivas redes de drenagem na área do Sistema Aquífero Cárstico da Bairrada.

O rio Cértima (Figura 3.8), sub-afluente do rio Vouga, nasce na Serra do Buçaco, ligeiramente a Sul da Cruz Alta a uma altitude de 380 m, e percorre uma distância de aproximadamente 43km, na direcção geral Sul-Norte, atravessando quatro concelhos: Mealhada, Anadia, Oliveira do Bairro e Águeda, até desaguar no rio Águeda, nas imediações da ponte de Requeixo, não sem antes atravessar a Pateira de Fermentelos.

A bacia hidrográfica do rio Lis é uma bacia costeira com uma área de 945 km e localiza-se entre a bacia do rio Tejo, a Este, e a bacia do rio Alcoa, a Sul. O rio Lis nasce na povoação de Fontes, no concelho de Leiria e desagua no Oceano Atlântico, a Norte da praia da Vieira. O rio Lis tem cerca de 40 km e os seus principais afluentes são o rio Flora e a Ribeira da Caranguejeira, na margem direita, e o rio Lena e o rio Seco, na margem esquerda. Destes afluentes o rio Lena é o mais importante com 27 km de comprimento e uma área drenada de 189 km.

Em termos hidrológicos é importante salientar o escoamento superficial, visto que o mesmo vai condicionar a recarga do aquífero. A partir dos valores do escoamento e relacionando-os com a variação dos níveis piezométricos, é possível estimar se o grau da carsificação é baixo ou elevado,

revelando assim a sua permeabilidade. Para uma melhor compreensão do escoamento actual, foram retirados dados de escoamento superficial médio mensal (Figura 3.9) do Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Vouga, Mondego e Lis (RH4) (APA, 2016). A área da massa de água com contribuição para a bacia do Mondego é muito pequena e sem representatividade.



**Figura 3.9** – Escoamento superficial médio e precipitação média mensal para as bacias hidrográficas do Vouga e do Lis.

Neste sistema com uma área de 316 km<sup>2</sup> as principais formações aquíferas e mais produtivas, correspondem às Camadas de Coimbra e aos Calcários Margosos de Lemedo, sendo as Camadas de Coimbra as mais produtivas.

Todo o sistema apresenta uma heterogeneidade acentuada, típica de meios cárnicos, no qual se observam zonas com produtividade muito elevada, ao contrário de outras que apresentam uma produtividade baixa. Isto deve-se principalmente às características geológicas das camadas aflorantes, e à maior ou menor proximidade de eixos de drenagem subterrânea, onde a carsificação tem maior desenvolvimento.

Esta carsificação pode ser bem evidenciada pelos diferentes valores de caudais obtidos pelas captações existentes. Algumas permitem a extracção de caudais elevados (95 L/s e 100 L/s) como é exemplo das captações que abastecem o concelho da Anadia. Esta captações encontram-se perto de outras improdutivas ou com caudais muito menores. A região de Olhos de Ferveça também possui captações da Câmara Municipal de Cantanhede, com caudais superiores a 100 L/s. No entanto outros furos a distâncias próximas têm caudais muito pequenos, chegando a ser inferiores a 1 L/s (Almeida *et al.*, 2000).

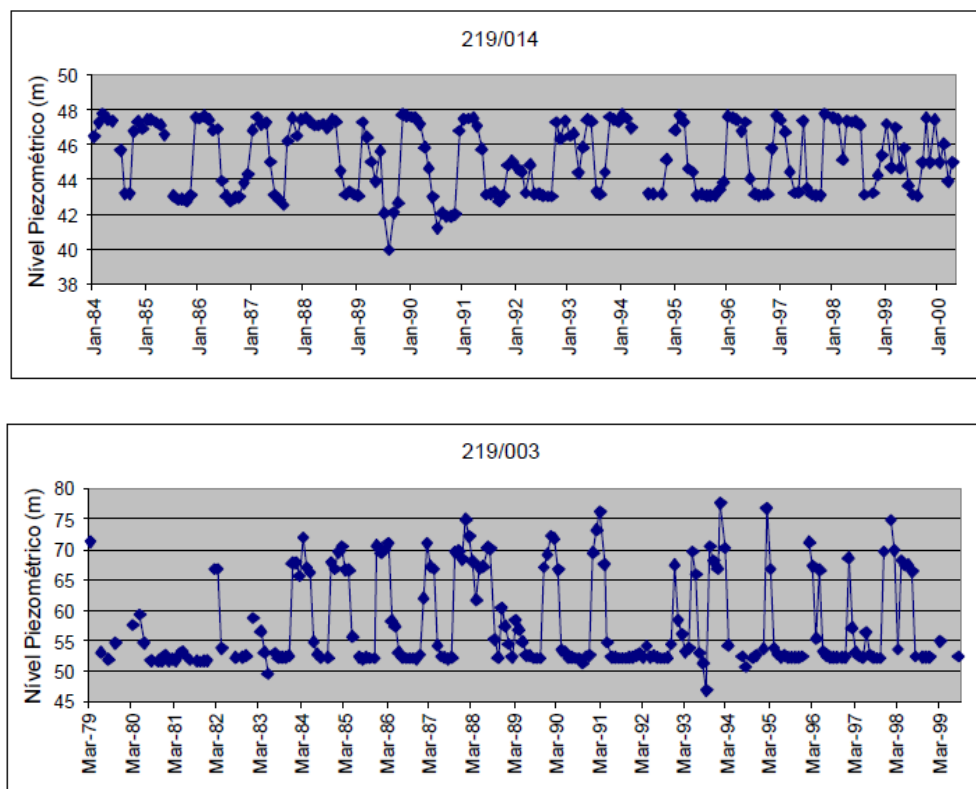
Os furos mais produtivos encontram-se na zona Anadia - Curia, juntamente com os poços de Olhos de Ferveça. Na estreita faixa de Jurássico que se estende entre Anadia e Mealhada não se encontram captações com alta produtividade, assim como para Norte no concelho de Oliveira de Bairro e até Fermentelos (Almeida *et al.*, 2000).

Foram estimados valores para transmissividade que vão de 15 a 600 m<sup>2</sup>/dia, a partir de 55 caudais específicos (Almeida, 1985; *in* Almeida *et al.*, 2000). Num furo pertencente à Câmara Municipal de Anadia foi atribuído o valor 22400 m<sup>2</sup>/dia para a transmissividade, e um valor de 8x10<sup>-4</sup> para o coeficiente de armazenamento (Peixinho de Cristo, 1985; *in* Almeida *et al.*, 2000). Este alto valor de transmissividade pode dever-se ao facto da captação ter sido construída perto de uma das exsurgências do sistema (nascente de Arcos), significando que esta captação está a explorar uma zona com elevada carsificação.

De acordo com Almeida *et al.* (2000), as variações piezométricas interanuais são muito pequenas, vão desde 3 a um máximo de 10 metros. Apenas um piezómetro (219/003), situado próximo de Souselas, possui oscilações mais elevadas que podem atingir os 25 metros.

Peixinho de Cristo (1985 *in* Almeida *et al.*, 2000) considerou a existência de uma divisória de águas subterrâneas no sistema, tendo verificado a ocorrência de descargas: no sector Ocidental, para Oeste, na direcção de Olhos de Fervença; no sector Oriental, para Noroeste, na direcção do sistema Cretácico para o rio Cértima, fazendo parte destas descargas a exsurgência de Arcos, nas proximidades da Anadia.

Os gráficos da Figura 3.10 permitem deduzir que o sistema se encontra, em média, em equilíbrio, não se verificando assim a presença de uma tendência persistente.



**Figura 3.10** – Variação piezométricas anuais (meses de Janeiro e Março) registadas em dois piezómetros monitorizados no sistema aquífero, *in* Almeida *et al.*, (2000).

É possível ver no gráfico do piezómetro 219/014 (Figura 3.10) que as oscilações variam em média na ordem dos 6 metros, com um máximo registado de 8 metros. Já no piezómetro 219/003 (Souselas) é possível verificar oscilações muito superiores.

A recarga deste sistema é feita directamente através da precipitação sobre a superfície aflorante, ou por drenância dos aquíferos freáticos subjacentes, sendo estes em grande parte constituídos por formações detríticas permeáveis. A recarga é facilitada pela carsificação que afecta o sistema carbonatado sendo também favorecida pela topografia no qual na generalidade é aplanada (Almeida *et al.*, 2000).

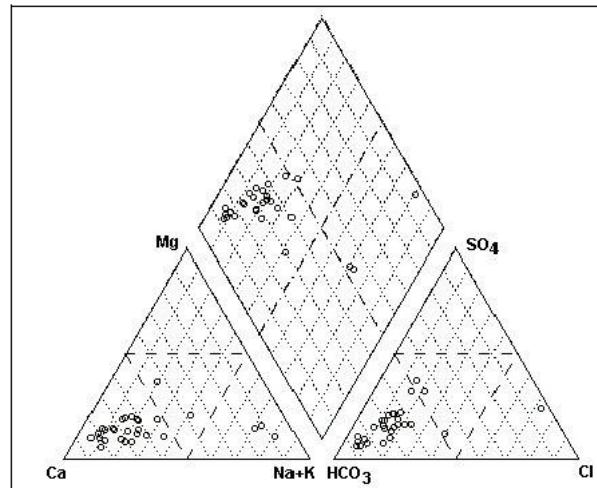
Dada a inexistência de uma cartografia que separe as formações Jurássicas mencionadas é difícil estimar os valores de recarga, tendo em conta que cada unidade tem diferentes valores de infiltração. Peixinho de Cristo (1985 *in* Almeida *et al.*, 2000) estimou a recarga, tendo em conta que o sistema se encontra aparentemente em equilíbrio, as saídas vão corresponder as entradas estimadas. As entradas médias anuais foram estimadas entre 10 a 15 km<sup>3</sup>/ano, valores que vão corresponder a uma recarga situada entre 300 e 450 mm/ano.

As saídas estimadas para o abastecimento público são de 3,0 hm<sup>3</sup>/ano para Cantanhede, 0,5 hm<sup>3</sup>/ano para Oliveira do Bairro, 1,0 hm<sup>3</sup>/ano para a Anadia 0,5 hm<sup>3</sup>/ano para a Mealhada, correspondendo a um total de 5,0 hm<sup>3</sup>/ano. Para a indústria não deverá ultrapassar os 0,5 hm<sup>3</sup>/ano, e para a rega estima-se o valor de 3,0 hm<sup>3</sup>/dia.

É estimado um valor de 1 hm<sup>3</sup>/ano para a transferência subterrânea para o sistema aquífero do Cretácico de Aveiro (Marques da Silva, 1990; *in* Almeida *et al.*, 2000). As descargas naturais estimam-se em cerca de 4,5 hm<sup>3</sup>/ano e correspondem na sua maioria as exurgências principais de: Olhos de Fervença, Arcos, Tamengos e Curia.

Em Olhos de Fervença a Câmara Municipal de Cantanhede é a entidade exploradora da descarga das nascentes, controlando de forma sistemática a água que distribui através de tratamento de desinfeção por cloro gasoso.

A composição química das águas deste sistema aquífero é de tipo bicarbonatada cálcica (Figura 3.11). No que diz respeito à qualidade para produção de água para consumo humano (Almeida *et al.*, 2000), de um modo geral, todos os parâmetros estão acima do valor médio recomendado (VMR) definido no Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto. São uma excepção o pH, o ferro, potássio, magnésio e os nitratos. No que diz respeito ao valor máximo admissível (VMA) todos os valores são excedidos, excepto o pH.



**Figura 3.11** – Diagrama de Piper com a representação da composição das águas do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, *in* Almeida *et al.*, (2000).

## 4 Amostragem e Métodos Analíticos

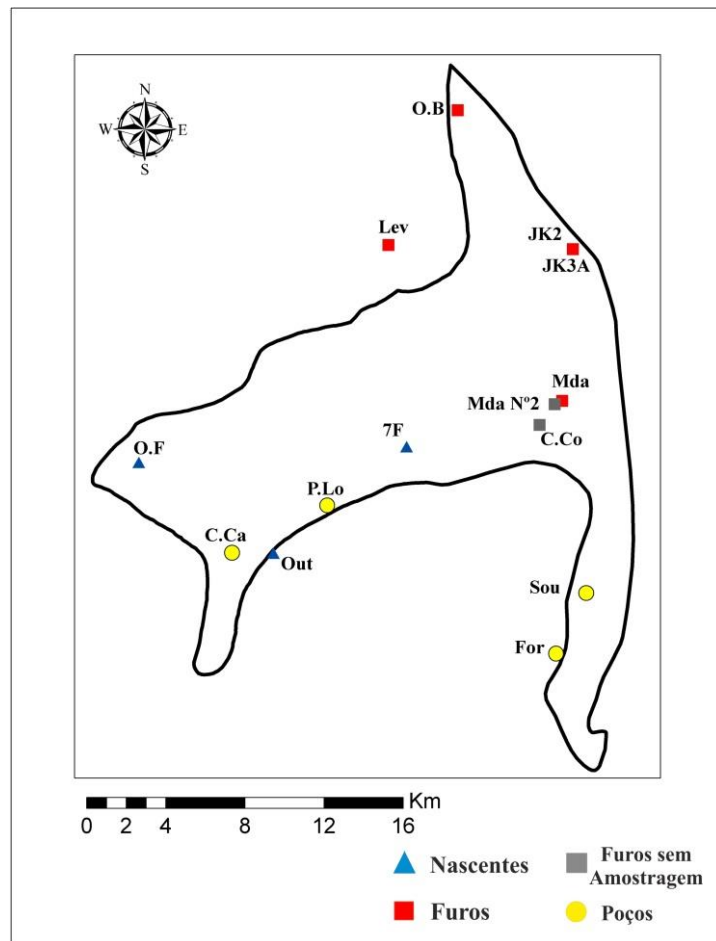
Realizaram-se três campanhas de amostragem de águas na zona do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, entre 8 de Novembro de 2017 e 22 de Janeiro de 2018. Foram recolhidas 12 amostras em nascentes, poços e furos para análise química e isotópica, e mais 2 amostras de precipitação colhidas perto dos furos JK2 e Mealhada. Seleccionaram-se pontos de água que representassem da melhor forma a massa de água, nomeadamente nas zonas que poderiam ser de recarga ou de descarga, e zonas envolventes. Infelizmente a amostragem de captações por furo nem sempre foi possível, por não ter sido permitido o acesso ou por não possuírem condições para amostragem. A localização dos pontos de amostragem está representada na Figura 4.1 e as suas coordenadas na Tabela 4.1.

A nascente de 7Fontes está localizada em depósitos de terraço do Quaternário, podendo estar a drenar um nível superior detrítico que pode contribuir para a recarga do aquífero carbonatado subjacente.

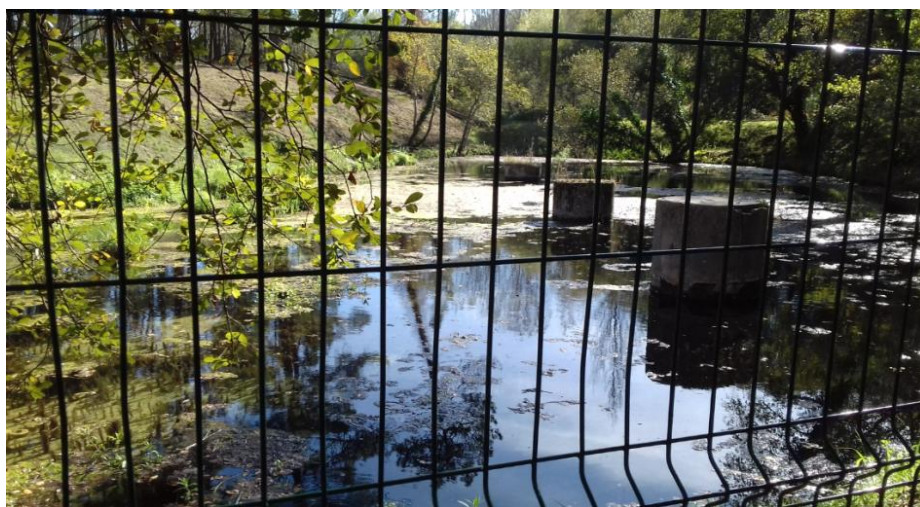
O poço de Fornos está localizado nos aluviões de uma ribeira que descarrega água do sistema Cársico da Bairrada mas, pelos actuais limites do sistema hidrogeológico, este poço poderá já estar a captar formações associadas ao sistema aquífero de Tentúgal (O5), no qual se encontram formações carbonatadas e uma grande variedade de formações detríticas.

O furo e o poço de Levira estão localizados numa zona pertencente ao sistema aquífero Cretácico de Aveiro (O2). A formação mais antiga deste sistema, os Arenitos do Carrascal (Grês grosseiros inferiores "Belasiano", Grês de Palhaça, Grês de Grada-Barcouço, Arenitos de Requeixo), assenta na zona Sul do sistema, sobre o Jurássico. Segue-se uma formação carbonatada, correspondente aos Calcários Apinhoados da Costa de Arnes (calcários e argilas cinzentas do Carrajão, calcários de Tentúgal, Calcários de Trouxemil, Calcários de Mamarrosa) do Cenomaniano/Turoniano. Segundo Marques da Silva (1992 *in* Almeida *et al.*, 2000), a formação carbonatada é considerada a camada guia mais importante da coluna Cretácica, apesar de possuir uma espessura pequena, não superior a 15 metros. A formação tem maior desenvolvimento a Sul, (perto da fronteira com o Cársico da Bairrada), adquirindo um carácter cada vez mais terrígeno para Norte, acabando por desaparecer praticamente a Norte de Aveiro. Estas captações foram incluídas neste trabalho na tentativa de se entender a possíveis interligações entre diferentes sistemas.

A nascente de Olhos de Ferverça emerge no leito do rio, apresentando uma grande produtividade. A água é actualmente captada por oito poços para o abastecimento público (Figura 4.2).



**Figura 4.1** - Localização dos locais de amostragem na área da Massa de Água Cársico da Bairrada.



**Figura 4.2** – Nascente de Olhos de Ferverça. É possível visualizar duas das oito captações existentes.

**Tabela 4.1** - Locais e data da amostragem de águas subterrâneas; estão representadas as coordenadas geográficas e o tipo de amostragem realizado: química = análise química de elementos maiores;  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  refere-se à amostra para determinação de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $^3\text{H}$  a determinação do Trítio.

Locais de Amostragem	Designação	Número e Data da Campanha	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Físico-Química	$\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$	$^3\text{H}$
Nascente O. Ferverça (218/45)	O.F	1ª (08/11/2017)	40°20'48.48"N	8°41'38.76"W	x	x	x
Furo O. Do Bairro (197/1)	O.B	1ª (08/11/2017)	40°30'35.50"N	8°30'26.32"W	x	x	x
Nascente Sete Fontes	7F	1ª (08/11/2017)	40°21'24.80"N	8°32'13.44"W	x	x	x
Furo Anadia JK2 (208/4)	JK2	2ª(06/12/2017)	40°26'46.87"N	8°26'14.99"W	x	x	-
Furo Anadia JK3A (208/2)	JK3A	2ª(06/12/2017)	40°26'46.87"N	8°26'14.99"W	x	x	-
Furo de Levira	Lev	2ª(06/12/2017)	40°26'55.79"N	8°32'54.51"W	x	x	-
Poço de Levira	Lev2	2ª(06/12/2017)	40°26'55.79"N	8°32'54.51"W	-	-	-
Furo Mealhada (219/277)	Mda	2ª(06/12/2017)	40°22'38.77"N	8°26'34.86"W	x	x	-
Furo Mealhada Nº2	Mda Nº2	2ª(06/12/2017)	40°22'33.33"N	8°26'53.20"W	-	-	-
Precipitação Nº1 (JK2)	PNº1	2ª(06/12/2017)	40°26'46.87"N	8°26'14.99"W	-	x	-
Precipitação Nº2 (219/277)	PNº2	2ª(06/12/2017)	40°26'46.87"N	8°26'14.99"W	-	x	-
Casal Comba (219/296)	C.C	3ª(22/01/2018)	40°21'58.83"N	8°27'24.72"W	-	-	-
Poço de Casal de Cadima	C.Ca	3ª(22/01/2018)	40°18'21.51"N	8°38'9.82"W	x	x	-
Nascente Outeiro	Out	3ª(22/01/2018)	40°18'26.48"N	8°36'53.70"W	x	x	-
Poço de Penha da Lomba	P.Lo	3ª(22/01/2018)	40°19'44.41"N	8°34'57.66"W	x	x	-
Poço de Souselas	Sou	3ª(22/01/2018)	40°17'22.45"N	8°25'42.30"W	x	x	-
Poço de Fornos	For	3ª(22/01/2018)	40°15'43.18"N	8°26'46.58"W	x	x	-

Em cada ponto de amostragem foram medidos *in situ* os parâmetros temperatura, pH e condutividade eléctrica, com recurso a termómetros e potenciómetros da Marca Eutech. Em cada local foram recolhidos 2 L de amostra para determinação da composição física e química em elementos maiores e 100 mL de amostra para determinação dos isótopos estáveis  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ . Foram recolhidas três amostras de água subterrânea (500 mL) para determinação do isótopo radioactivo Trítio, em captações localizadas no centro e nos extremos do Sistema Aquífero.

Foi recolhida água da chuva para análise de isótopos  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , em frascos com um funil e forrados a película de alumínio, colocados junto das captações JK2 em Anadia e 219/277 na Mealhada.

As análises de elementos maiores foram realizadas no Laboratório de Química do Instituto Superior Técnico (LAIST), vários métodos (potenciometria para o pH; conductimetria para a condutividade; volumetria/potenciometria para a alcalinidade e ião bicarbonato; emissão de plasma para a sílica, e ferro dissolvidos; cromatografia iónica para os iões fluoreto, cloreto, cálcio, magnésio, potássio, e sódio; absorção molecular para o ião nitrito; espectroscopia de absorção molecular para o azoto amoniacal). A determinação dos isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  foi efetuada no Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares do Instituto Superior Técnico (C2TN/IST), por espectrometria de massa. A análise do Trítio foi realizada no Environmental Isotope Laboratory do Dept. of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, Canadá, por detector de cintilação (3 - LKB Wallac 1220 Quantulus) com a precisão de 0,5 UT.

## 5 Piezometria do Sistema Aquífero

Em poços e, sempre que possível em furos foi medida a profundidade da água com uma sonda de nível (Marca SEBA Hydrometrie). A profundidade foi transformada em cota piezométrica tendo em consideração a cota da boca das captações.

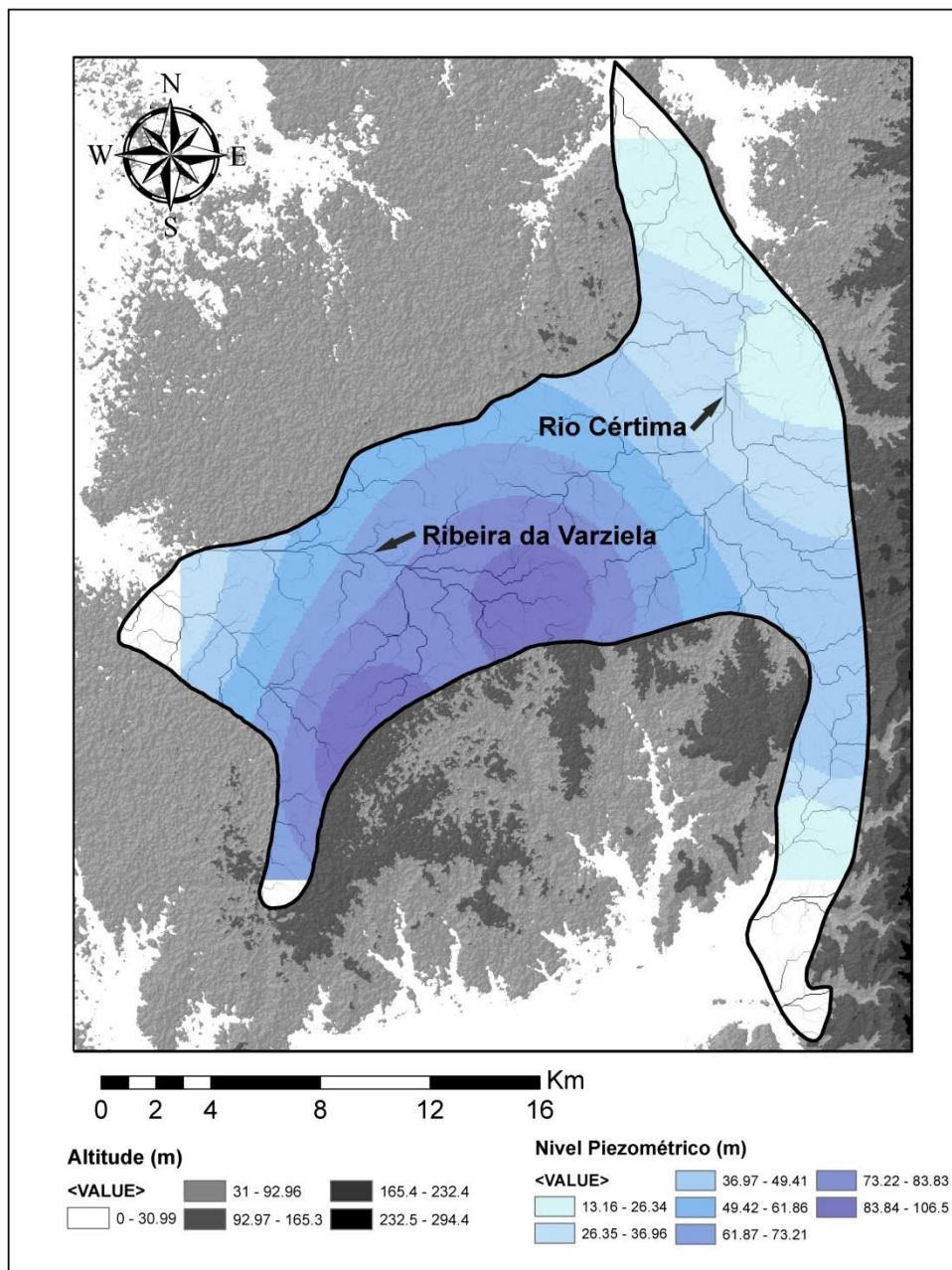
Os valores registados são apresentados na Tabela 5.1, os quais permitiram construir um mapa da piezometria e profundidade da água no Sistema Aquífero. Os mapas, representados nas Figuras 5.1, 5.2, e 5.3 foram obtidos com recurso ao software de SIG ArcGIS 10.4 e a interpolação dos níveis foi realizada por Krigagem esférica.

As zonas com nível piezométrico mais elevado situam-se na parte Sul do Cársico da Bairrada, mais para Oeste, sendo possível identificar duas zonas máximas distintas perto de Cantanhede, Cordinhã e Penha da Lomba. Os níveis piezométricos mais baixos encontram-se na zona perto da nascente de Olhos de Fervença, e ao longo do limite Este do Sistema Aquífero, nas zonas Oliveira do Bairro, Mealhada, e Souselas. Verifica-se também que o nível piezométrico acompanha o relevo da região (Figura 5.2).

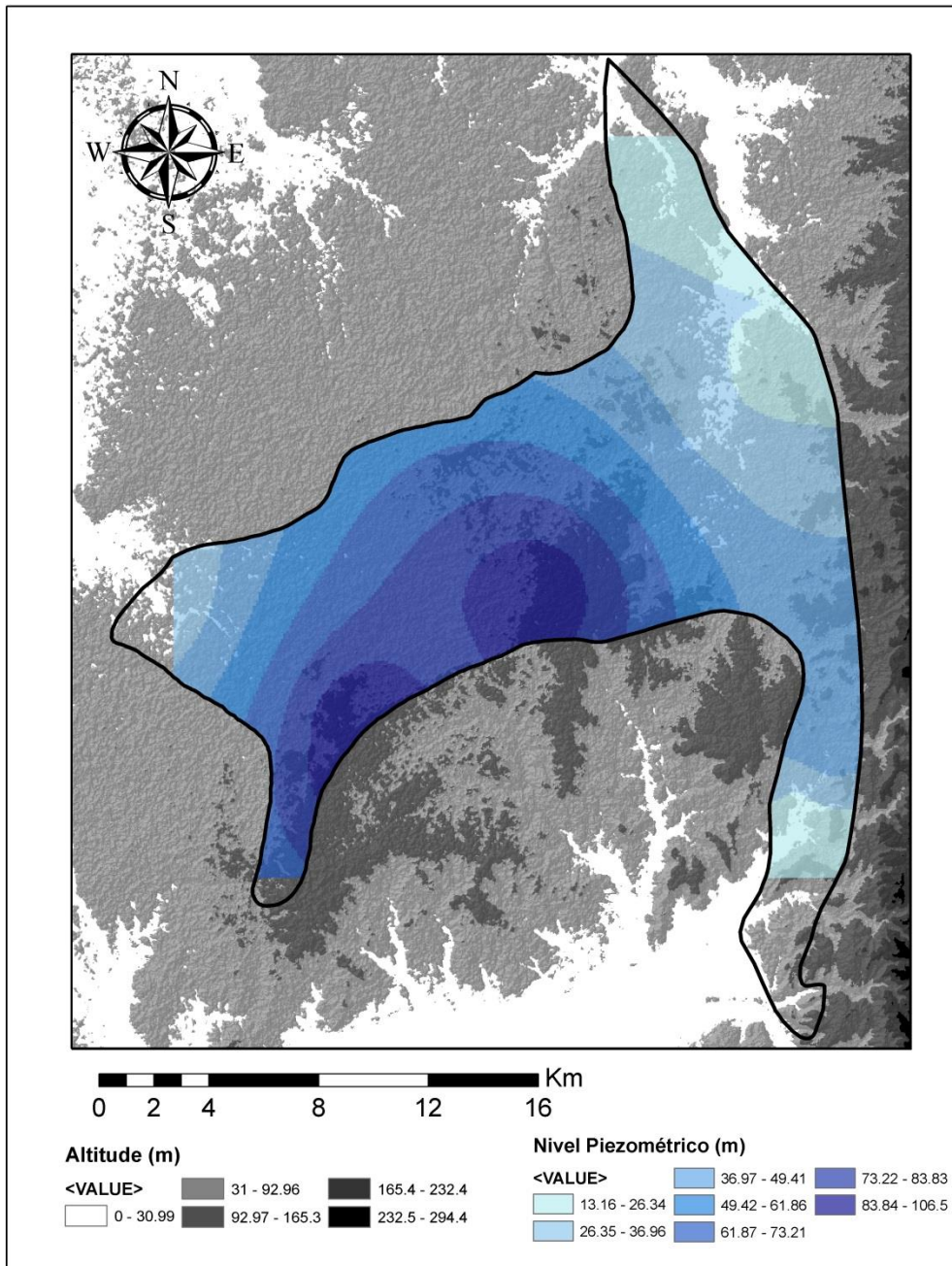
Observa-se que as maiores profundidades para a água se situam na zona Este do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, na região da Mealhada e Souselas, e as menores para Oeste na região de Cantanhede.

**Tabela 5.1** – Tabela com a altimetria, profundidade dos furos, profundidade da água, e nível piezométrico, com as respectivas coordenadas e data da campanha para cada amostra.

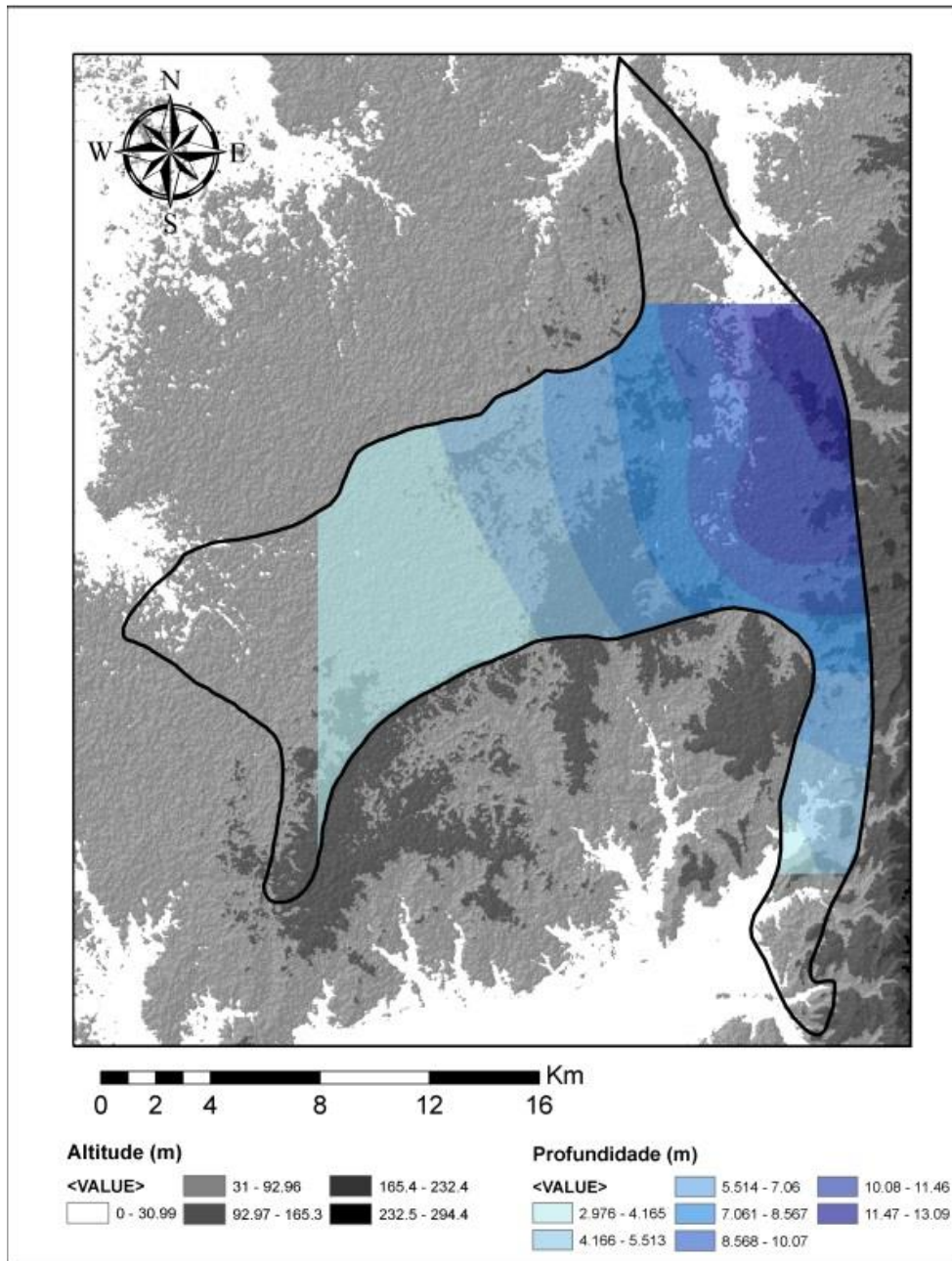
Locais de Amostragem	Número e Data da Campanha	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Altitude (m)	Profundidade do Furo (m)	Profundidade da Água (m)	Nível Piezométrico (m)
Nascente O.fervença (218/45)	1º (08/11/2017)	40°20'54.31"N	8°41'43.08"W	27	-	0	27
Furo O.Do Bairro (197/1)	1º (08/11/2017)	40°30'35.50"N	8°30'26.32"W	15	126.8	-	-
Nascente7 Fontes	1º (08/11/2017)	40°21'24.80"N	8°32'13.44"W	95	-	0	95
Furo Anadia JK2 (208/4)	2º(06/12/2017)	40°26'46.87"N	8°26'14.99"W	34	66	20.9	13.1
Furo Anadia JK3A (208/2)	2º(06/12/2017)	40°26'46.87"N	8°26'14.99"W	34	69.43	-	-
Furo de Levira	2º(06/12/2017)	40°26'55.79"N	8°32'54.51"W	44	32	-	-
Poço de Levira	2º(06/12/2017)	40°26'55.79"N	8°32'54.51"W	44	-	2.54	41.46
Furo Mealhada (219/277)	2º(06/12/2017)	40°22'38.77"N	8°26'34.86"W	52	120	13.52	38.48
Furo Mealhada N°2	2º(06/12/2017)	40°22'33.33"N	8°26'53.20"W	59	-	19.2	39.8
Casal Comba (219/296)	3º(22/01/2018)	40°21'58.83"N	8°27'24.72"W	53	-	6.36	46.65
Poço de Casal de Cadima	3º(22/01/2018)	40°18'21.51"N	8°38'9.82"W	84	-	1.72	82.28
Nascente Outeiro	3º(22/01/2018)	40°18'26.48"N	8°36'53.70"W	108	-	0	108
Poço de Penha da Lomba	3º(22/01/2018)	40°19'44.41"N	8°34'57.66"W	80	-	1.5	78.5
Poço de Souselas	3º(22/01/2018)	40°17'22.45"N	8°25'42.30"W	28	-	2	26
Poço de Fornos	3º(22/01/2018)	40°15'43.18"N	8°26'46.58"W	18	-	2	16



**Figura 5.1** – Representação da piezometria na área do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada (interpolação obtida por *krigagem*) em conjunto com a rede de drenagem, sobre carta hipsométrica.



**Figura 5.2** - Visualização do nível piezométrico em conjunto com a topografia da região do Sistema Aquífero Cárstico da Bairrada.



**Figura 5.3** - Representação da profundidade da água na área do Sistema Aquífero Cárstico da Bairaada (interpolação obtida por *krigagem*) em conjunto com a rede de drenagem, sobre carta hipsométrica.

## 6 Estudo Físico-Químico da Massa de Água

### 6.1 Fácies Hidrogeoquímica

A fácies hidrogeoquímica representa a composição de uma água e a sua designação é dada pelos aniões e catiões mais abundantes, representando mais de 50% da concentração total. Para esta caracterização usou-se o diagrama de Piper que se encontra na Figura 6.1.

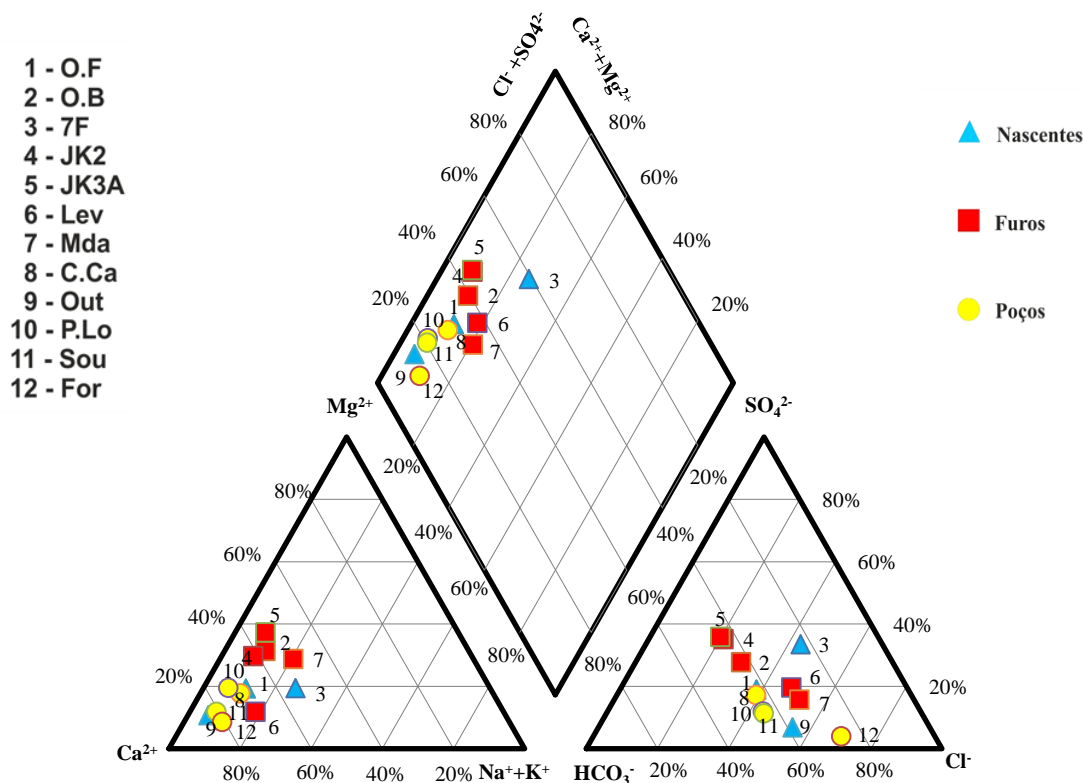


Figura 6.1 - Representação da composição das amostras em diagrama de Piper.

No triângulo do diagrama correspondente aos catiões, as águas agrupam-se na zona das águas cálcicas. Os furos JK2, JK3 e Oliveira do Bairro são mais enriquecidas em magnésio, e o furo da Mealhada revela uma maior percentagem de sódio e potássio, juntamente com a nascente de 7Fontes. Os poços agrupam-se nas percentagens mais altas em cálcio, com a nascente do Outeiro e poço de Fornos com os valores mais altos.

No triângulo correspondente aos aniões, as amostras encontram-se essencialmente no centro do diagrama, no qual corresponde a classificação de águas mistas, com exceção do furo da Mealhada, e o poço de Fornos. Estes classificam-se como águas cloretadas. Podem estar mais influenciados pela maior presença de halite ou por contaminação agrícola e/ou industrial.

As águas mistas com maior concentração de sulfatos pertencem aos furos JK2 e JK3A. A presença deste ião pode estar relacionada com contaminação agrícola dissolução ou com a presença de gesso na rocha aquífera.

As águas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com excepção da nascente das 7 Fontes, que se projecta no campo das águas sulfatadas-cloretadas, cálcicas-magnesianas.

## **6.2 Parâmetros Físicos e Composição Química**

As determinações analíticas dos parâmetros físicos e químicos das águas amostradas estão compilados na Tabela 1, em anexo.

### **6.2.1 Temperatura**

As águas amostradas são todas frias com temperatura média de 15,6 °C, a temperatura mais alta foi observada no furo JK2 (208/4) com 17,7 °C. As temperaturas mais baixas foram registadas em poços e durante a 3ª campanha (Tabela 2 em anexo), efectuada no inverno, ao contrário dos restantes que foram recolhidas no Outono.

### **6.2.2 pH**

As águas apresentaram valores de pH entre 5,3 na nascente das 7Fontes e 7,31 na nascente Olhos de Ferverença. A relação entre a alcalinidade e o pH pode ser visualizada na Figura 6.2. Observam-se duas linhas evolutivas a partir de um ponto comum traduzido pela nascente das 7 Fontes, com os valores mais baixos de alcalinidade e pH. A primeira linha inclui todos os furos, com o furo da Mealhada a apresentar os valores mais baixos de alcalinidade e destacando-se para fora da linha de tendência. Os furos de Oliveira do Bairro e JK2 apresentam os valores mais altos de alcalinidade. A nascente de Olhos de Ferverença apresenta o valor de pH mais alto. A correlação dos valores da primeira linha é de  $R^2 = 0,98$  sugerindo uma evolução comum. A segunda linha evolutiva possui uma correlação mais baixa de  $R^2 = 0,85$ . Esta inclui todos os poços a céu aberto juntamente com a nascente do Outeiro. Os poços de Casal de Cadima, Povia da Lomba e a nascente do Outeiro agrupam-se em valores semelhantes de alcalinidade. O Poço de Souselas apresenta valores mais altos de alcalinidade mas possui o pH mais baixo. Para esta linha evolutiva os valores mais altos de alcalinidade e pH foram registados no poço de Fornos, o qual se apresenta claramente mais destacado em relação aos restantes poços.

A água do furo da Mealhada apresenta o valor mais baixo de alcalinidade, apesar de se encontrar numa zona de descarga do aquífero, não sendo de excluir a possibilidade de misturas com outras águas menos mineralizadas.

A água explorada pelo furo de Levira apresenta o menor pH e menor alcalinidade das águas de furos. Este furo está localizado nos calcários de Tentúgal (constituídos por calcários margosos, grés calcário,

e margas) que afloram numa pequena área perto do limite do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada. Visto que a profundidade desta perfuração atinge os 32 metros, e a espessura máxima dos calcários é apenas de 15 metros (Marques da Silva, 1992., in Almeida *et al.*, 2000), a mineralização desta água pode ser controlada pela circulação nos arenitos do Carrascal ou ter mistura com águas mais profundas.

A ocorrência de águas com diferente alcalinidade e pH semelhante poderá indicar a dissolução de diferentes minerais carbonatados ou a ocorrência de dissolução destes em sistema fechado e em sistema aberto à entrada de  $\text{CO}_{2(g)}$ .

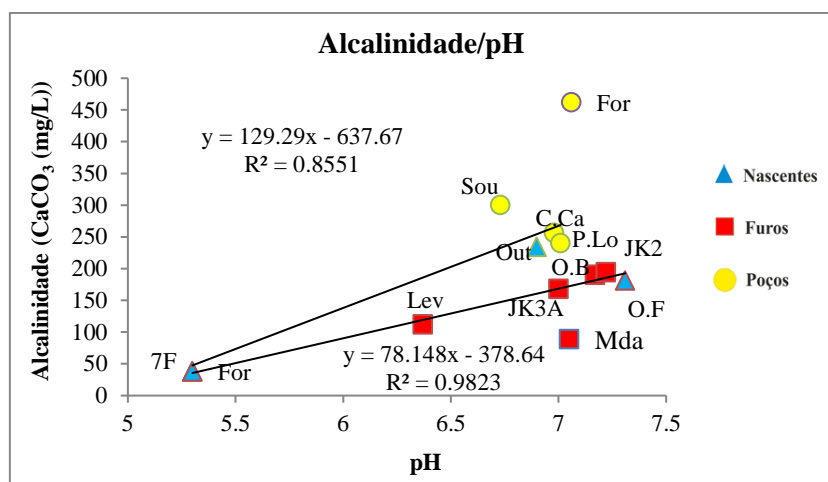


Figura 6.2 - Gráfico com a variação da alcalinidade ( $\text{CaCO}_3$ ) em função do pH nas águas amostradas.

### 6.2.3 Condutividade Eléctrica

A condutividade eléctrica variou entre 252,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , na nascente 7Fontes, e 965,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no poço de Fornos. Realce-se que a água deste poço apresentava cor e cheiro, indicando a presença de alguma contaminação. A condutividade eléctrica da água dos furos variou entre 367,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (furo da Mealhada, 219/277) e 697  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (furo de Anadia JK2, 208/04).

As concentrações em  $\text{HCO}_3^-$  em função da condutividade eléctrica das águas podem ser observadas na Figura 6.3. A correlação entre os dois parâmetros é de  $R^2=0,84$ , indicando uma forte dependência do  $\text{HCO}_3^-$  na mineralização destas águas. A água menos mineralizada é a de 7Fontes e a mais mineralizada a do poço de Fornos.

Relação semelhante é obtida entre a dureza da água e a condutividade eléctrica (Figura 6.4), com  $R^2=0,97$ , evidenciando um forte contributo dos iões de cálcio e magnésio para a mineralização. Os valores mais baixos estão representados pela nascente de 7Fontes e os mais altos pelo poço de Fornos. A relação entre as concentrações de magnésio com a condutividade eléctrica é praticamente inexistente (Figura 6.5;  $R^2 = 0,17$ ), mostrando que o ião cálcio é o ião com maior importância, e que a concentração de calcite magnésiana e dolomite não é semelhante no aquífero. Os furos de Oliveira do Bairro, JK2 e JK3A agrupam-se, com os valores mais elevados de magnésio.

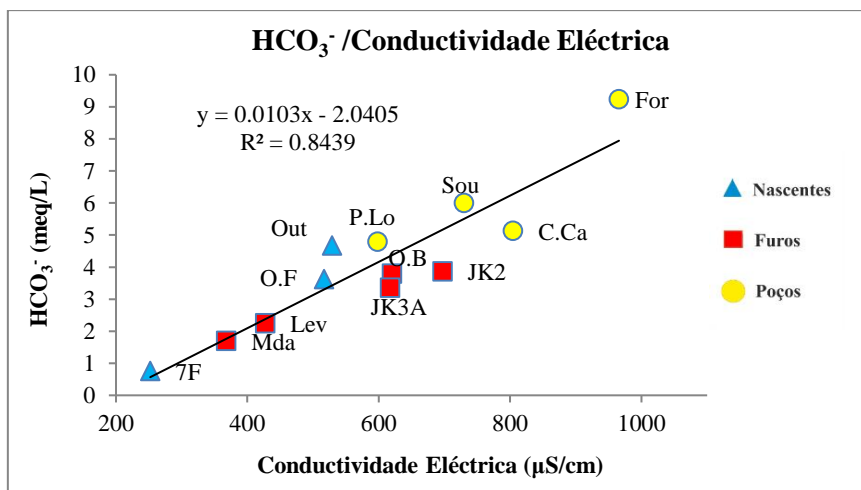


Figura 6.3 – Gráfico com a correlação entre o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e condutividade eléctrica das águas amostradas.

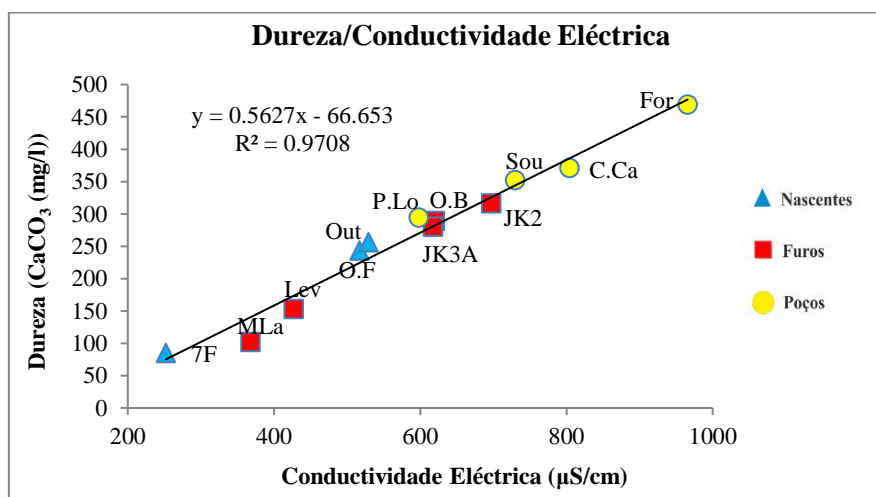


Figura 6.4 – Gráfico com a correlação entre a dureza total e condutividade eléctrica das águas amostradas.

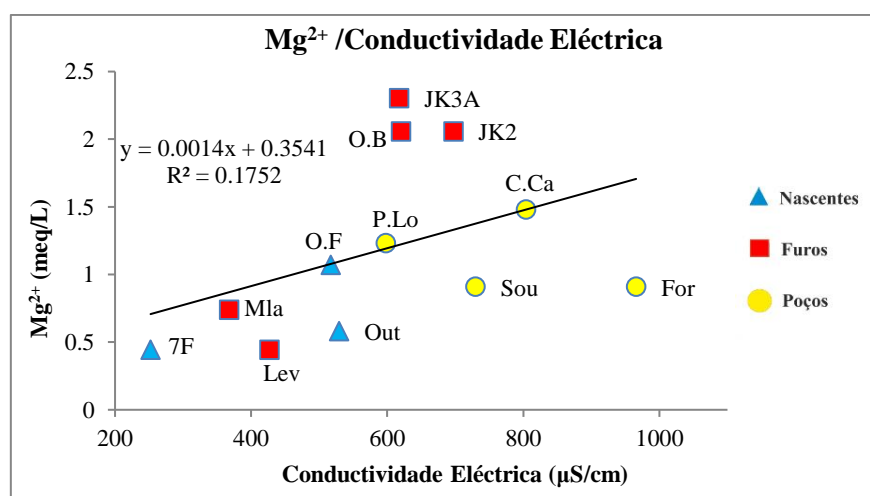
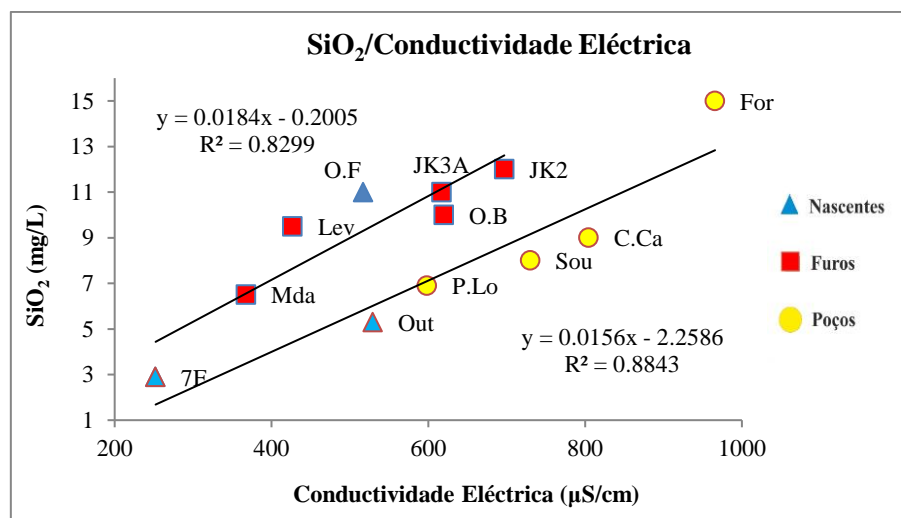


Figura 6.5 - Gráfico com a correlação entre o magnésio dissolvido e a condutividade eléctrica das águas amostradas.

A sílica dissolvida foi igualmente correlacionada com a condutividade eléctrica, mostrando sistemas distintos, como pode ser observado na Figura 6.6.



**Figura 6.6** - Gráfico com a correlação entre SiO<sub>2</sub> dissolvida e a condutividade eléctrica das águas amostradas. Observam-se duas correlações distintas.

Observa-se uma correlação para os poços, incluindo a nascente do Outeiro, com concentrações de sílica dissolvida mais baixas, e outra correlação para os furos e nascente de Olhos de Fervença, com maiores concentrações de sílica.

Para o poço de Fornos, que possui valores mais elevados de sílica dissolvida em relação às outras amostras, esta poderá ter origem nas formações de Arenitos e Argilas do Viso, e no Grês do Furadouro (uma formação essencialmente quartzítica, micácea, fina a muito fina, em que para o topo passa a grês mais grosseiro, menos micáceos e argilosos, ricos em areão e seixo fino de quartzo).

De modo a tentar compreender a contribuição de ião cloreto para a mineralização destas águas foi feita uma representação gráfica Cl<sup>-</sup> vs condutividade eléctrica, na Figura 6.7. Pode-se observar que os valores mais baixos de cloreto e condutividade eléctrica são observados na nascente das 7Fontes, e os mais altos no poço de Fornos, com correlação linear de R<sup>2</sup>= 0,68, evidenciando assim que a condutividade nestas águas poderá, em parte, dependente do ião cloreto.

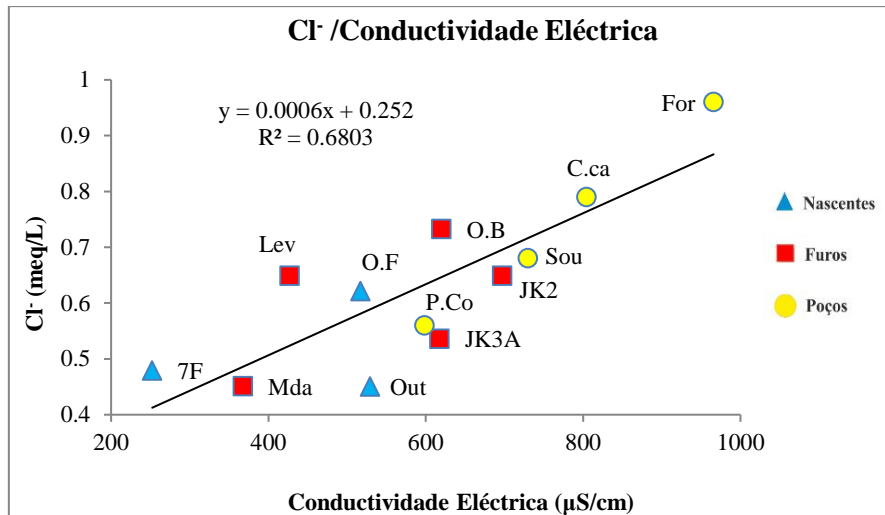


Figura 6.7 - Gráfico com a correlação do íon cloreto com a condutividade eléctrica das águas amostradas.

### 6.3 Índices Hidrogeoquímicos

Os índices hidrogeoquímicos permitem identificar quais os processos que contribuem para a composição química das águas, no que diz respeito a interacção água-rocha e possíveis contaminações.

#### 6.3.1 Índice $rCa^{2+}/rHCO_3^-$

O índice  $rCa^{2+}/rHCO_3^-$  pode indicar a dissolução de rochas carbonatadas, caso a relação seja de 1:1 em meq/L. A Figura 6.8 mostra a correlação linear entre estes dois iões, com de  $R^2=0,96$ , apontando para uma origem comum e dissolução de calcite. O declive da recta de correlação possui um valor de 0,92 indicando uma relação próxima de 1:1.

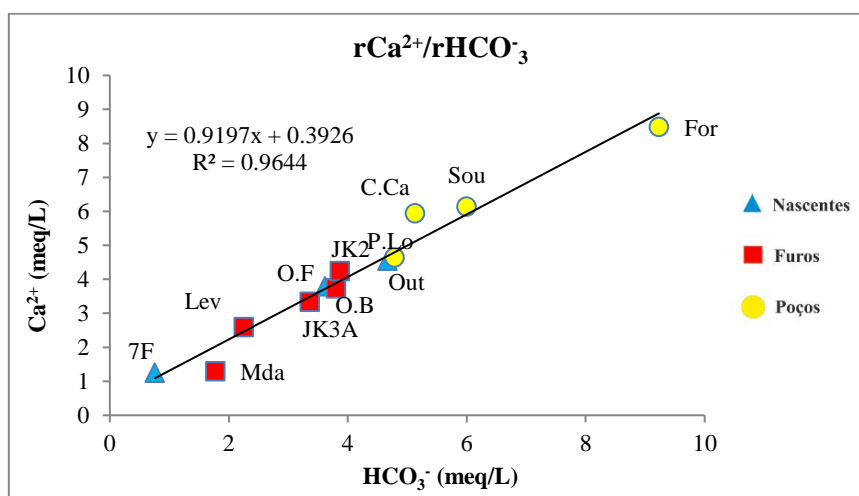


Figura 6.8 – Correlação entre os iões de cálcio e bicarbonato nas águas amostradas.

As concentrações mais baixas de  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$  foram encontradas nas águas da nascente 7Fontes e Olhos de Ferverença e em todos os furos. Todos os poços, juntamente com a nascente do Outeiro, formam o grupo com valores mais elevados.

### 6.3.2 Índice $r\text{Mg}^{2+}/r\text{HCO}_3^-$

De modo a que possa haver mais dados que apoiem o facto dos carbonatos de magnésio contribuírem menos para a mineralização das águas, representou-se a concentração do ião magnésio *vs* a do ião  $\text{HCO}_3^-$ . Os resultados estão representados no gráfico da Figura 6.9. Verifica-se que não existe uma correlação linear entre os dois iões.

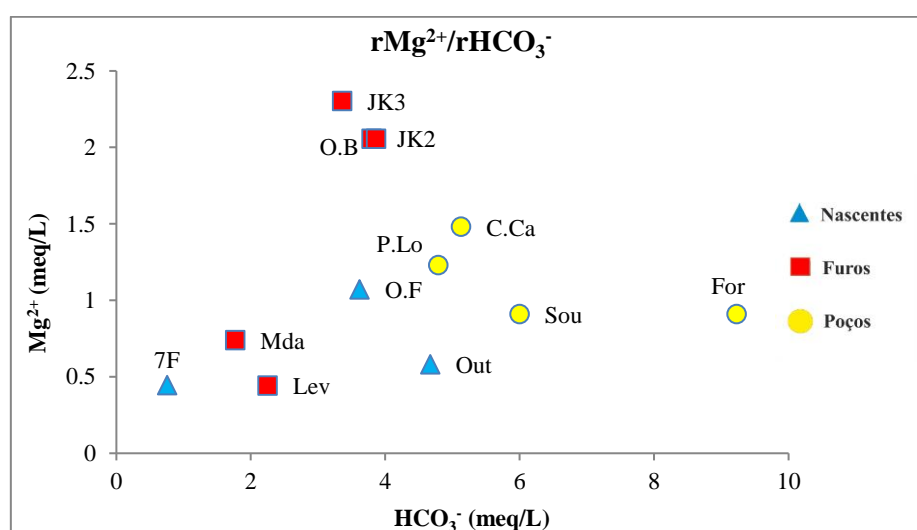
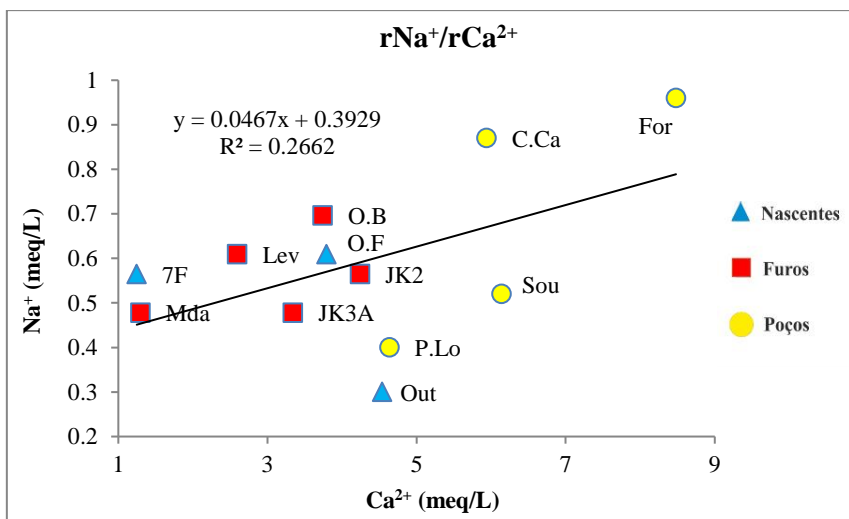


Figura 6.9 – Gráfico com a correlação entre o ião magnésio e o ião bicarbonato nas águas amostradas.

### 6.3.3 Índice $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$

Com o índice  $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$  pretende-se identificar a contribuição do ião sódio através da dissolução de filossilicatos presentes nas formações carbonatadas. Os resultados apresentam-se na Figura 6.10.

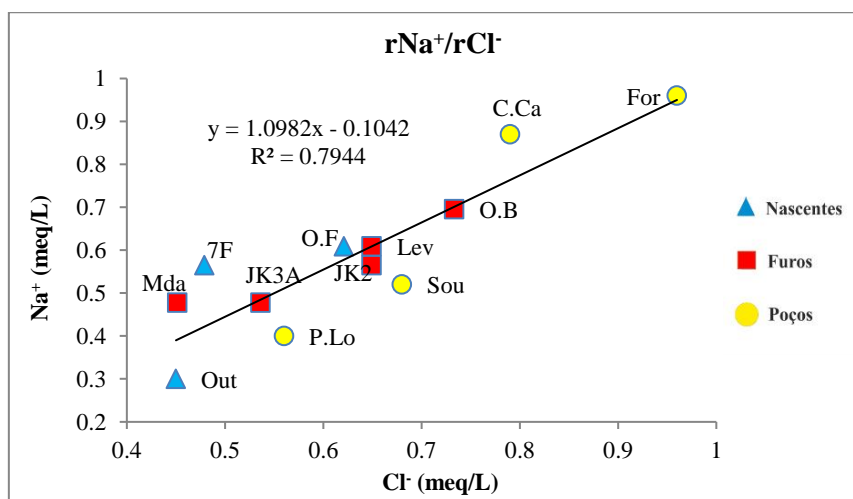
O gráfico apresenta uma linha de tendência com uma correlação muito baixa, com  $R^2=0,26$ . Pode-se no entanto observar que todos os furos e as nascentes de 7Fontes e Olhos de Ferverença têm uma maior proximidade à linha de tendência, podendo indicar que algum sódio pode ser proveniente da dissolução de filossilicatos. Já os poços e nascente do Outeiro revelam uma dispersão elevada de valores em relação a linha de tendência.



**Figura 6.10** - Gráfico com a correlação entre os íons sódio e o cálcio.

### 6.3.4 Índice rNa<sup>+</sup>/rCl<sup>-</sup>

Para que se possa compreender se os íons de sódio e de cloro têm a mesma origem, projectaram-se as concentrações destes dois íons num diagrama Na<sup>+</sup> vs Cl<sup>-</sup> (Figura 6.11). As amostras correlacionam-se linearmente com R<sup>2</sup>= 0,79 e declive próximo de 1. O facto de o declive ter um valor aproximado a 1, aponta para que estes íons tenham origem nas águas meteóricas ou na dissolução de halite, que é o caso dos furos de Levira, Oliveira do Bairro, JK3A, JK2 e nascente de Olhos de Fervença. Nas restantes captações a água pode ter sofrido alguma contaminação, já que as amostras que se afastam da linearidade nos poços Penha da Lomba, Souselas e Casal de Cadima, juntamente com a nascente do Outeiro.



**Figura 6.11** – Gráfico com a correlação entre os íons de sódio e de cloro.

### 6.3.5 Índice $rNO_3^-/rSO_4^{2-}$

A concentração em nitrato é muitas vezes acompanhada pela de sulfato quando ambos os iões têm origem em contaminação agrícola. A relação entre o ião nitrato e o ião sulfato dissolvidos nas águas, está representada na Figura 6.12. Não é observada qualquer correlação entre estes dois iões.

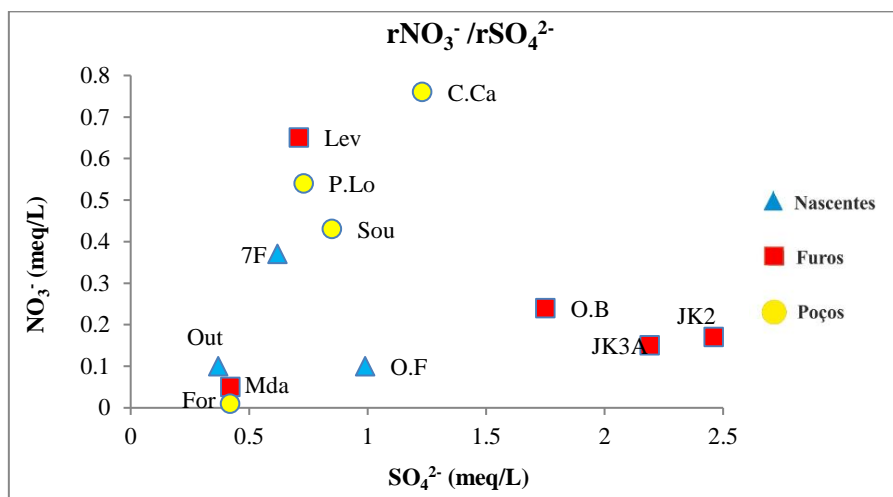


Figura 6.12 – Gráfico com a relação entre os iões nitrato e sulfato.

Destacam-se os poços de Casal de Cadima, Souselas e Póvoa da Lomba, que apresentam um valor mais elevado de nitratos, evidenciado que estes estarão sob maior influência de contaminantes. O furo de Levira também apresenta valores elevados de nitratos.

Os furos de Oliveira do Bairro, JK3A e JK2 apresentam concentrações altas em sulfatos, mas baixas em nitratos, indicando que é provável que o sulfato tenha uma origem na dissolução de minerais como o gesso.

### 6.3.6 Índice $rSO_4^{2-}/rCa^{2+}$

O índice  $rSO_4^{2-}/rCa^{2+}$  dá indicações sobre a origem comum destes iões, nomeadamente na dissolução de gesso (Figura 6.13). Os valores mais baixos de sulfato e cálcio podem ser observados na nascente 7Fontes e no furo Mealhada. Os furos de Oliveira do Bairro, JK3A e JK2 correlacionam-se com o valor de  $R^2=0,63$ , apontando para várias origens destes dois iões.

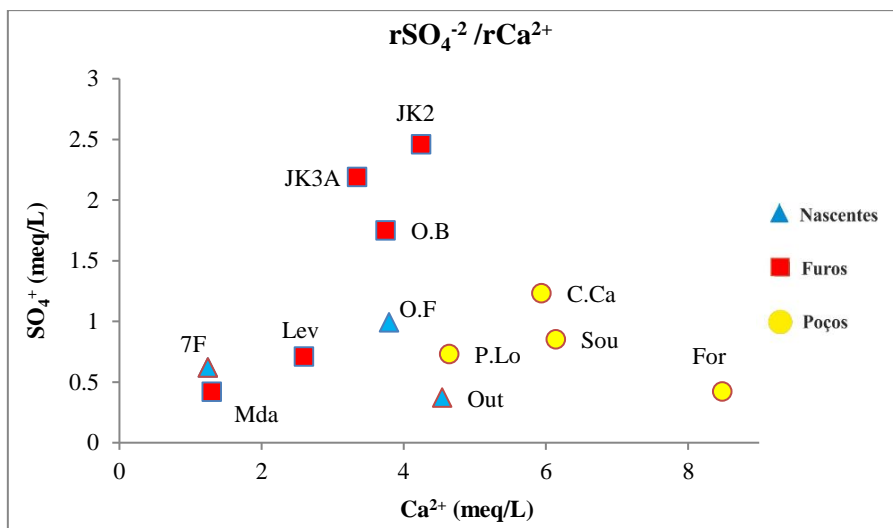


Figura 6.13 - Grafico com a relação entre os iões sulfato e cálcio.

## 6.4 Índices de Saturação

O sentido de uma reacção química e as concentrações relativas dos reagentes e dos produtos são controlados pelo equilíbrio termodinâmico da reacção (Langmuir, 1997). Com base em constantes termodinâmicas de equilíbrio é, assim, possível prever as concentrações de espécies dissolvidas em sistemas aquosos e prever a sua evolução.

### 6.4.1 Conceitos Termodinâmicos

Para definir os conceitos termodinâmicos das reacções é necessário referir a energia livre de Gibbs (G). A mesma mede a energia que é envolvida no decorrer de uma reacção. A energia da reacção quando, esta atinge o equilíbrio, designa-se termodinamicamente como “Estado de Energia Mínima de Gibbs” (Langmuir, 1997).

A energia livre de Gibbs pode ser definida com os conceitos de entalpia (H) e entropia (S). A entalpia representa a energia de calor que a substância contém e  $\Delta H$  a variação de entalpia entre os produtos e os reagentes de uma reacção. A entropia é uma medida do estado de ordem/desordem de um sólido e de soluções sólidas sendo também essencial para ajudar a explicar a estabilidade dos complexos aquosos. Uma mudança na entropia de qualquer sistema será igual ao calor que esta absorve/liberta a dividir pela sua temperatura absoluta (°K).

A energia livre de Gibbs relaciona-se com a constante de equilíbrio termodinâmico (Keq) das reacções aquosas. É possível relacionar  $\Delta G$  com Keq de uma determinada reacção química [6.1]



em que A e B são os reagentes, C e D os produtos e a, b, c e d os coeficientes estequiométricos, através da equação 6.2, onde  $\Delta G_r^0$  é a variação da energia livre de Gibbs padrão de formação,  $\Delta G_r^0$  é a variação da energia livre de Gibbs padrão de reacção,

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

$$\Delta G_r^0 = \sum \Delta G_r^0 \text{ Produtos} - \sum \Delta G_r^0 \text{ Reagentes} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

R a constante dos gases, T a temperatura (°K) e [ ] representa a actividade da espécie.

É possível calcular os valores da actividade das substâncias dissolvidas e determinar o valor Q das reacções, que é normalmente designado como produto de actividade iónica. O sentido da reacção de dissociação/dissolução é obtido através do cálculo do índice de saturação (IS). O IS é obtido pela razão entre Q e a contante de equilíbrio termodinâmica  $K_{eq}$  [6.4]:

$$IS = \frac{Q}{K_{eq}} \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Se o valor de IS for 1, a solução está em equilíbrio, se  $IS > 1$  a solução está sobressaturada e a reacção tende a progredir para a esquerda, podendo precipitar uma fase sólida, se  $IS < 1$  a solução está subsaturada e a reacção tende a progredir para direita e a dissolver. O IS também pode ser dado na forma logarítmica pela equação:

$$IS = \text{Log}_{10} \left( \frac{Q}{K_{eq}} \right) \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Em que o equilíbrio se situa no intervalo  $-0,1 < \text{Log}(IS) < 0,1$ .

#### 6.4.2 Cálculo dos IS da Água

Com o objectivo de melhor se compreender o percurso subterrâneo da água e as interacções água - rocha, foram calculados os índices de saturação das águas em relação a diversas fases sólidas e gasosas, utilizando o programa automático PHREEQC Interactive (Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J, 2017). As análises dos resultados permitiu verificar que as fases mais envolvidas eram: calcite, dolomite, aragonite, gesso,  $\text{SiO}_2$  (sílica amorfa), calcedónia e  $\text{CO}_2$  gasoso.

Os resultados para as amostras de Olhos de Ferverça, Oliveira do Bairro, JK2, JK3, Levira, e Mealhada, encontram-se na Figura 6.14.

O logaritmo dos índices de saturação encontram-se essencialmente abaixo do valor de -0,1 para todas as águas, indicando sub-saturação, com excepção do índice para a calcite nas amostras de Olhos de Ferverça e JK2, que se encontram em equilíbrio (Log IS entre -0,1 e 0,1). A água do furo de Oliveira do Bairro está ligeiramente sub-saturada em calcite com Log IS= -0,2.

As águas de Olhos de Ferverça, Oliveira do Bairro, JK2, JK3A estão em equilíbrio com a calcedónia. Levira encontra-se sub-saturada mas quase a atingir o equilíbrio. Olhos de Ferverça e JK2 encontram-

se em equilíbrio com a calcite. A água do furo de Oliveira do Bairro encontra-se sub-saturada mas próxima do equilíbrio com a calcite.

O furo de JK3A encontra-se a poucos metros do furo de JK2 ( $\approx 30$  metros), todavia a água está subsaturada em calcite contrariamente à do furo de JK2 que está em equilíbrio. A causa poderá ser as heterogeneidades referentes as fracturas e cavidades no cársico, que podem condicionar a infiltração com mais água para a zona do furo onde se encontra JK3A

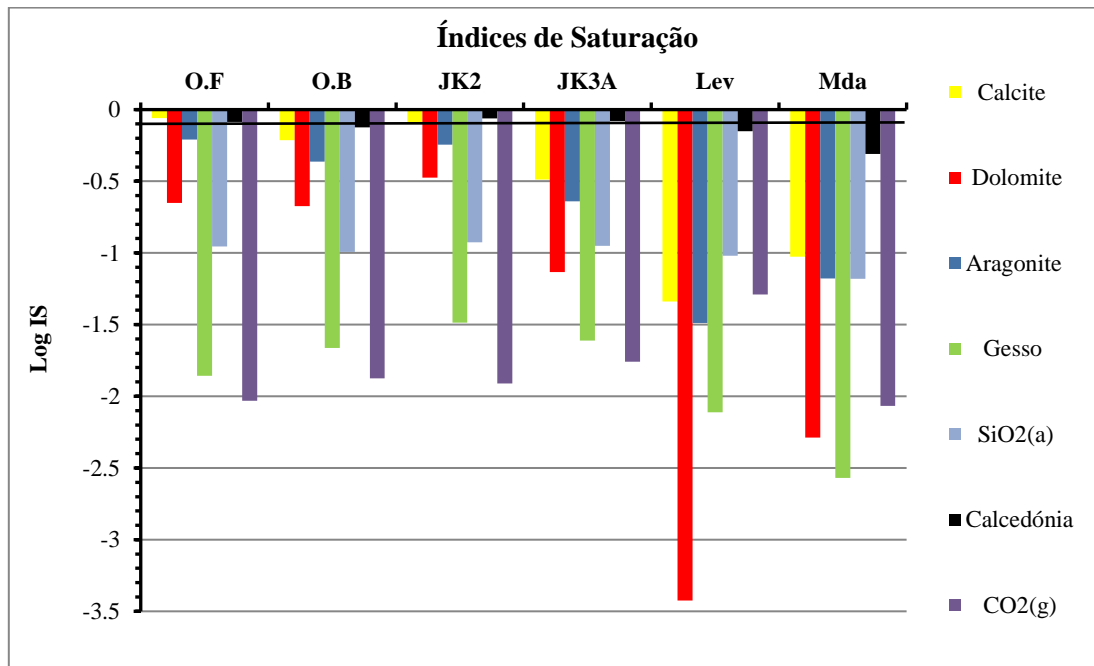


Figura 6.14 – Índices de saturação das águas amostradas nos furos e na nascente de Olhos de Fervença.

Para as amostras recolhidas nos poços e na nascente do Outeiro os resultados do Log do IS podem ser vistos na Figura 6.15.

As águas dos poços de Penha da Lomba e Souselas e da nascente do Outeiro estão sub-saturadas em todas as fases sólidas utilizadas no cálculo. São excepções os poços de Casal de Cadima e Fornos. A água do poço de Casal de Cadima encontra-se em equilíbrio com a calcite e a calcedónia. Já a água do poço de Fornos possui condições para precipitar calcite e aragonite. As captações a céu aberto estão sujeitas a diluição por precipitação e igualmente a evaporação, no qual esta última aumenta a concentração da química das águas, provocando subida dos índices de saturação. Assim estes factores com caracter mais aleatório, torna difícil a interpretação destes sistemas. No entanto verifica-se que a calcite é sempre um dos minerais com que as águas estão mais próximas do equilíbrio. Pode-se verificar que a nascente do Outeiro apresenta equilíbrios químicos em relação às fases sólidas semelhantes, à excepção do equilíbrio com o gesso.

Para todas as amostras das Figuras 6.13 e 6.14, os índices de saturação em relação à calcite estão sempre mais perto do equilíbrio que em relação à dolomite; os índices de saturação em relação ao gesso são sempre muito negativos, à excepção das águas dos furos de Oliveira do Bairro, JK2, e JK3A mais próximas do equilíbrio com este mineral.

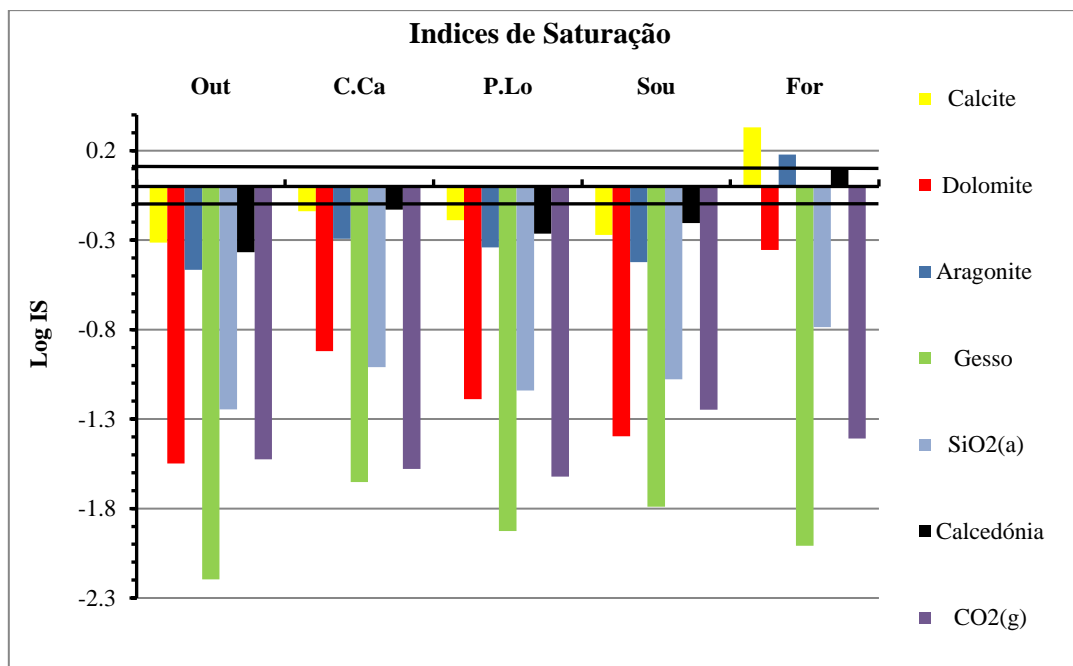


Figura 6.15 – Índices de saturação das águas amostradas nos poços e na nascente do Outeiro.

A nascente 7Fontes apresenta baixa mineralização e pH mais baixo do que as restantes amostras. Por esta razão os índices de saturação são na sua maioria muito inferiores, os quais estão representados na Figura 6.16. Os índices de saturação para a calcite, dolomite e aragonite são muito baixos, principalmente para a dolomite. Esta água poderá assim estar sob a influência de formações essencialmente siliciosas, no qual apresentam uma dissolução mais lenta. Ou poderá ainda ser águas muito recentes, no qual ainda não tiveram tempo para adquirir mineralização semelhantes as restantes amostras colhidas no cársico.

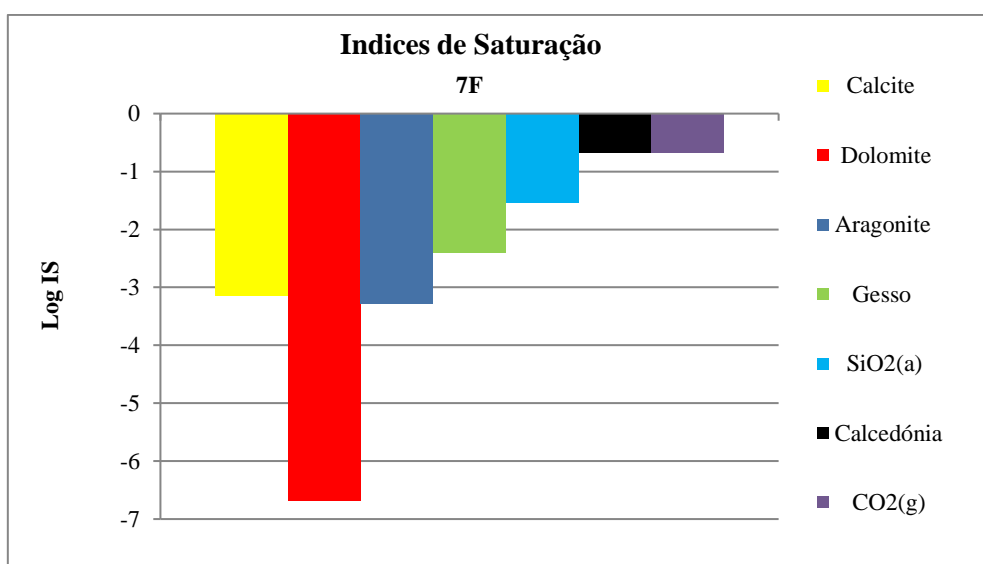
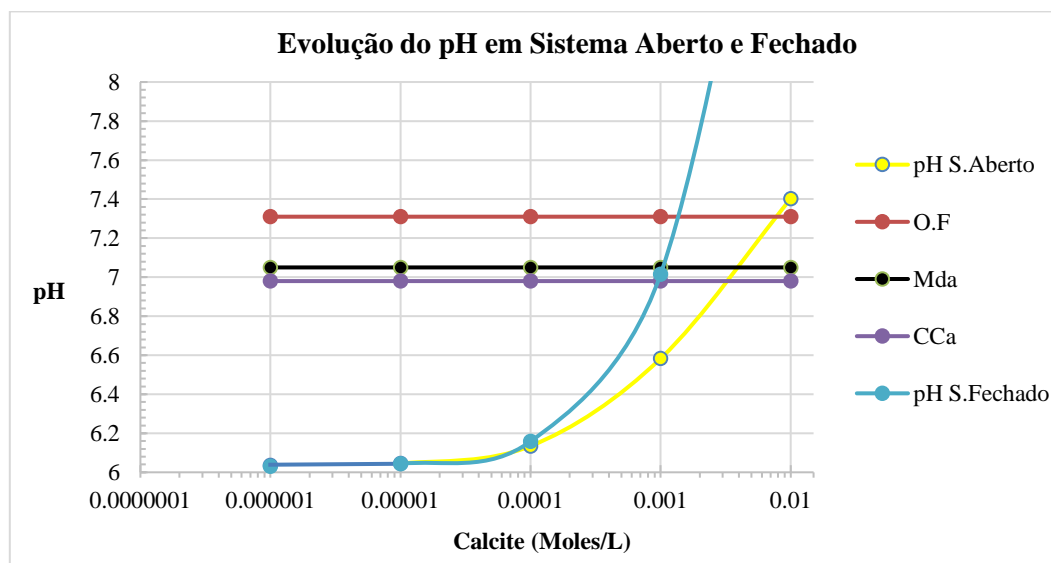


Figura 6.16 – Índices de saturação da água da nascente das Sete Fontes em relação a diversas fases sólidas e gasosa.

## 6.5 Modelação de Sistemas Abertos e Fechados

De modo a obter uma melhor compreensão dos sistemas estudados no que diz respeito à dissolução da rocha carbonatada, foram realizadas duas modelações no programa Phreeqc Interactive (Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J, 2017) da dissolução de calcite em sistema aberto e em sistema fechado. Utilizou-se a composição química da nascente 7Fontes como ponto de partida, visto esta água poder ser representativa da água inicial que se infiltra no aquífero. As duas modelações consistiram em dissolver calcite por incrementos sucessivos (reação de progressão). Foi feita uma simulação para um sistema fechado e a outra para um sistema aberto, estudando-se a variação do IS da calcite, do pH e das concentrações do ião cálcio e do bicarbonato. Utilizou-se o poço de Casal de Cadima, a nascente de Olhos de Fervença e o furo da Mealhada como produtos finais da dissolução. Os resultados para a variação de cada parâmetro em sistema fechado e aberto podem ser vistos nas Figura 6.17, 6.18, 6.19, e 6.20.

A água do poço de Casal de Cadima (CCa, Figura 6.17 6.18, e 6.19) intersecta a curva do sistema aberto em valores de dissolução próximos de 0,002 moles de calcite. Já para a curva do sistema fechado os valores da intersecção já não se encontram com a mesma concordância como para o sistema aberto, principalmente para o gráfico da Figura 6.19, onde a intersecção da recta do poço de Casal de Cadima se faz bem acima de 0,01 moles de calcite dissolvida, resultando assim numa quantidade excessiva de  $\text{HCO}_3^-$ .



**Figura 6.17** – Gráfico representativo da evolução do pH da água com dissolução de calcite em sistema aberto (pH S.Aberto) e fechado (pH S.Fechado). As linhas horizontais representam o pH medido nas águas Casal de Cadima (CCa), Olhos de Fervença (O.F) e Mealhada (Mda).

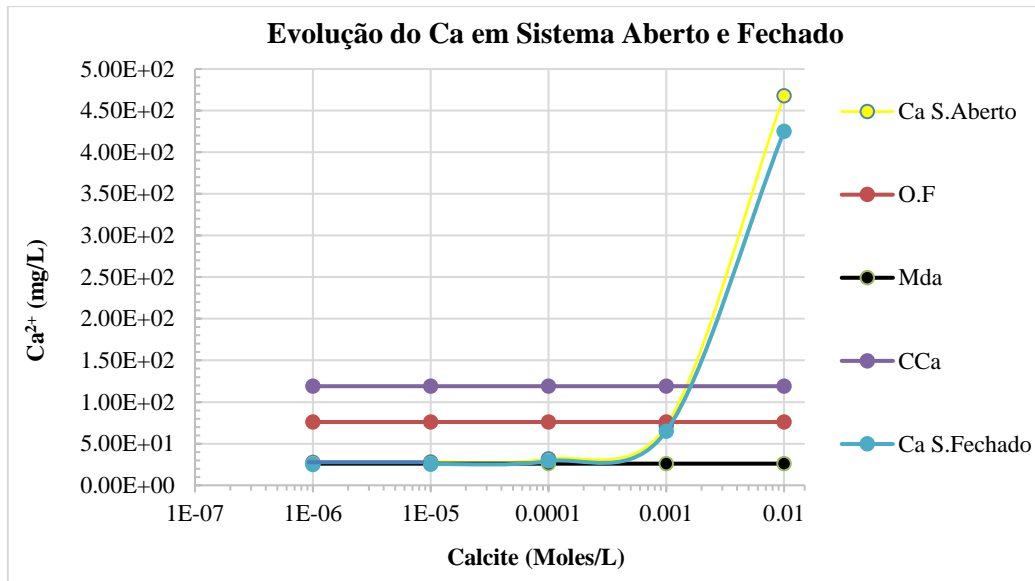


Figura 6.18 – Gráfico representativo da evolução da concentração do cálcio dissolvido, com a dissolução de calcite em sistema aberto (Ca S.Aberto) e sistema fechado (Ca S.Fechado). As linhas horizontais representam a concentração do ião de cálcio encontrada nas águas Casal de Cadima (CCa), Olhos de Ferverça (O.F.) e Mealhada (Mda).

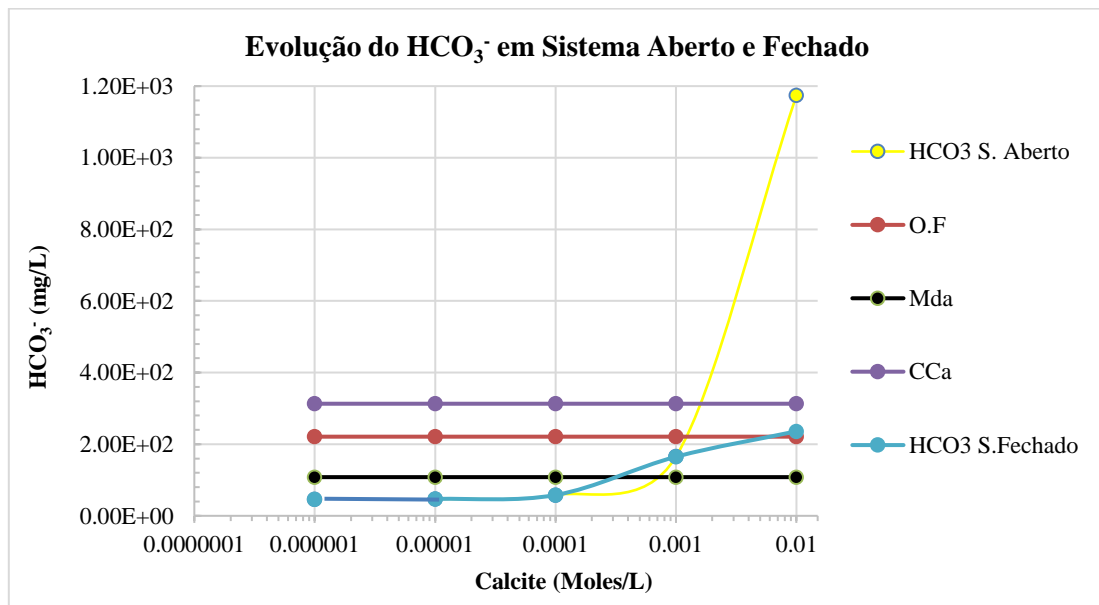


Figura 6.19 - Gráfico representativo da evolução da concentração do ião bicarbonato com o aumento da dissolução de calcite em sistema aberto (HCO<sub>3</sub> S.Aberto) e sistema fechado (HCO<sub>3</sub> S.Fechado). As linhas horizontais representam a concentração de bicarbonato nas águas de Casal de Cadima (CCa), Olhos de Ferverça (O.F.) e Mealhada (Mda).

As concentrações dos iões ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ) e do pH nas águas de Olhos de Ferverça e Mealhada intersectam a curva do sistema aberto em locais diferentes. Os valores de dissolução observados para a nascente de Olhos de Ferverça são de 0,009 moles de calcite considerando o pH, 0,001 moles considerando o cálcio e 0,001 moles considerando o bicarbonato. À semelhança, para a água do furo

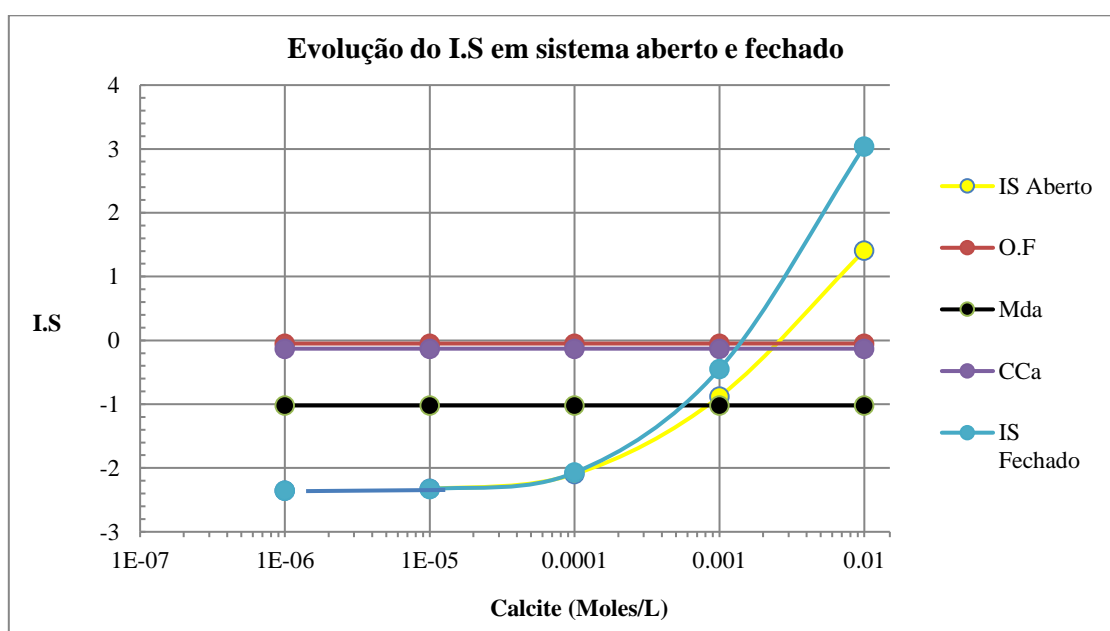
da Mealhada a dissolução de calcite é de 0,004 moles (pH), 0,0001 moles ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e 0,0006 moles ( $\text{HCO}_3^-$ ).

Já para a intersecção com a curva de dissolução em sistema fechado os valores são mais próximos. Para a nascente de Olhos de Fervença os valores observados são de 0,0015 moles (pH), 0,001 moles (Ca) e 0,004 moles ( $\text{HCO}_3^-$ ). Para a água do furo da Mealhada observam-se valores de 0,001 moles (pH) e 0,0004 moles ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ). Todos os valores de intersecção para estas duas captações estão próximos de 0,001 moles, com excepção dos valores de cálcio e bicarbonato para o furo da Mealhada que são excepcionalmente baixos, 0,0004 moles de calcite dissolvida, e representando assim valores muito mais baixos de cálcio e bicarbonato para esta captação, tal como já foi apresentado anteriormente na análise da Figura 6.2. Estes valores poderão ter como causa uma mistura de águas.

Assim, aparentemente as águas das captações de Olhos de Fervença e Mealhada, enquadram-se melhor na composição química de soluções que dissolvem calcite em sistema fechado a  $\text{CO}_{2(g)}$ .

A mesma análise feita aos índices de saturação da água em relação à calcite, com a dissolução deste mineral, pode-se verificar que a água do poço de Casal de Cadima terá dissolvido cerca de 0,0002 moles de calcite em ambos os sistemas. Para a nascente de Olhos de Fervença os valores aproximam-se mais de 0,001 moles de calcite para o sistema fechado e 0,003 moles em sistema aberto.

Para a água do furo da Mealhada os valores de calcite dissolvida em ambos os sistemas são muito baixos, com 0,0005 moles de dissolução em sistema fechado (Figura 20) corroborando o observado nas Figuras 6.17, 6.18 e 6.19.



**Figura 6.20** - Gráfico representativo da evolução índice de saturação em sistema aberto e fechado com o aumento da calcite dissolvida. As linhas horizontais representam o índice de saturação obtido para as captações de Casal de Cadima, Olhos de Fervença, e Mealhada.

## 7 Estudo Isotópico

### 7.1 Isótopos no Ciclo Hidrológico

O estudo de isótopos em águas naturais é actualmente uma importante ferramenta para caracterizar o sistema hidrológico. É assim possível estudar o comportamento das diferentes massas de água (oceanos, águas subterrâneas, rios, lagos, precipitação), e resolver problemas relacionados com águas para uso humano.

Estas aplicações são variadas e são determinadas pelos diferentes isótopos estáveis ou radioactivos. Os isótopos no ciclo hidrológico podem ser assim usados para as seguintes aplicações:

- 1 – Tanto os isótopos estáveis como os radioactivos podem ser usados como marcadores de uma massa de água ou de uma determinada quantidade de água. Torna possível por exemplo localizar o percurso da água de precipitação conhecendo os valores de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  da mesma.
- 2 – Quando ocorre transição de componentes como a água ou  $\text{CO}_2$  de uma fase para outra, ocorre mudança nas razões entre o isótopo raro e o isótopo abundante. Quando se analisam as diferenças entre estas razões, é possível determinar os processos geoquímicos ou hidrológicos que tiveram lugar. Estas diferenças são analisadas principalmente com isótopos estáveis.
- 3 – Sobre determinadas condições os isótopos radioactivos permitem determinar idades da água subterrânea, utilizando isótopos de  $^{14}\text{C}$  e Trítio. As diferenças nas concentrações isotópicas radioactivas também podem ser usadas como marcadores.

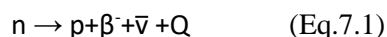
### 7.2 Isótopo Radioactivo Trítio

#### 7.2.1 Decaimento Radioactivo

Os isótopos radioactivos representam núcleos instáveis no qual com o tempo, acabam por se desintegrar (decaimento) formando núcleos estáveis. A sua instabilidade deve-se aos mesmos possuírem um excesso de prótons ou neutrões.

No processo de decaimento do núcleo, parte da energia de ligação do núcleo instável (energia potencial), é perdida como energia cinética (Q). Esta energia cinética é distribuída igualmente pelas partículas formadas durante o decaimento e são emitidas de acordo com as leis da conservação da energia e momento linear. O decaimento produz normalmente um núcleo no qual se vai encontrar no estado excitado e que, posteriormente, passado um intervalo de tempo extremamente curto, o núcleo decai para o estado energético fundamental, emitindo radiação electromagnética com comprimento de onda curto, normalmente sobre a forma de um ou mais raios gama ( $\gamma$ ). Existem vários processos de decaimento, mas será descrito o processo que envolve o isótopo radioactivo Trítio usado neste trabalho.

O decaimento  $\beta^-$  é a forma de decaimento mais comum, e no qual ocorre no decaimento do isótopo radioactivo Trítio. Este consiste na transformação de um neutrão (n) do núcleo em um próton (p), através da emissão de um electrão ( $\beta^-$ ) pela reacção:



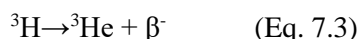
A reacção resulta na transformação do núcleo com uma mudança no número atómico Z para Z+1, com a emissão de um electrão e um anti-neutrino ( $\bar{\nu}$ ). A energia total da reacção Q é distribuída pelas partículas emitidas referidas anteriormente. Em alguns casos no decaimento  $\beta^-$ , o núcleo passa directamente para o estado fundamental, não ocorrendo assim a emissão de radiação gama. Este caso ocorre para o Trítio e o  $^{14}\text{C}$  (Mook, 2000).

### 7.2.2 O Isótopo Radioactivo Trítio

O isótopo radioactivo Trítio ( $^3\text{H}$ ), tem origem a partir reacção nuclear entre o azoto da atmosfera, e neutrões termais provenientes de raios cósmicos (Libby, 1946, *in* Mook, 2000). A reacção é definida como:



Depois da sua formação, o Trítio entra no ciclo hidrológico oxidando para  $^1\text{H}^3\text{HO}$ , até eventualmente decair para  $^3\text{He}$ , um isótopo leve do hélio, com a emissão de um electrão ( $\beta^-$ ) pela reacção:



Tendo o mesmo um período de semi-vida de acordo com a reavaliação mais recente de  $4500 \pm 8$  dias, o equivalente a 12.32 anos (Lucas e Unterweger, 2000, *in* Mook, 2000).

As abundancias naturais de Trítio podem ser apresentadas em Bq (Becquerel) por litro de água, ou em Unidades de Trítio (UT) que é equivalente a uma concentração de  $^3\text{H}/^1\text{H}$  de  $10^{-18}$  (1 UT=0,118 Bq/L).

As actividades do Trítio são relacionadas com uma amostra de água padrão, pois as mesmas são muito difíceis de determinar de modo específico e absoluto. Este objectivo foi realizado por a International Atomic Energy Agency (IAEA) e a National Institute of Standards and Technology (NIST) no qual determinou um padrão de Trítio denominado por a NBS-SRM 4361 de 11100 TU (Unterweger *et al.*, 1978, *in* Mook, 2000). Quando relacionada com esta amostra padrão as concentrações de  $^3\text{H}$  são dadas em valores absolutos (em UT).

A variação natural de Trítio na precipitação antes de 1953 rondava valores de 5 UT (0,6 Bq/L). Depois de 1953, o fabrico e teste de Bombas nucleares e termonucleares (bombas de hidrogénio) aumentou a quantidade de Trítio na atmosfera de modo a que no início dos anos 60, a concentração de Trítio na precipitação aumentou, temporariamente, cerca de 1000 vezes no Hemisfério Norte. Os valores têm vindo a decrescer atingindo valores normais no inverno e o dobro do valor no verão. Este fenómeno ocorre porque durante os testes nucleares, o Trítio foi essencialmente injectado para a estratosfera, tendo a partir desse momento iniciado um ciclo, no qual Trítio retorna à troposfera durante a primavera ao início do verão, dando assim lugar a uma variação sazonal (Carreira *et al.*, 2004).

O facto das águas subterrâneas terem sofrido contaminação de Trítio, impede que sejam datadas medindo apenas o grau de decaimento do Trítio. No entanto pode ser usado para determinar idades relativas. Por exemplo uma água que tenha  $^3\text{H} > 20$  UT terá uma idade posterior a 1963.

Em Portugal os valores de Trítio na atmosfera são mais altos no verão e mais baixos no inverno, correspondendo a variação sazonal mencionada anteriormente. Ocorre também um fenómeno

semelhante ao “Efeito continental” no Trítio embora de forma inversa. Os valores mais elevados são reportados no interior e os mais baixos no litoral, devido a diluição do Trítio nas massas de ar oceânicas. De acordo com Carreira *et al.*, (2004), o valor de Trítio obtido para a estação do Porto é de 4,5 UT. Será considerado este valor para a zona do Sistema Aquífero Cárstico da Bairrada, tendo em conta que esta representa a estação mais próxima onde foram obtidos valores para o Trítio na atmosfera.

### 7.2.3 Trítio na Massa de Água

As análises de Trítio forneceram os resultados representados na Tabela 7.1. Para determinar a idade das águas amostradas no Sistema Aquífero Cárstico da Bairrada foi usado o valor de 4,5 UT como valor inicial, e o tempo de semi-vida de 12,32 anos.

Obtiveram-se as idades aparentes descritas na Tabela 7.2. As águas da nascente de Olhos de Fervença e do furo de Oliveira do Bairro têm uma idade de aproximadamente 20 anos. Estas captações encontram-se em extremos opostos do Sistema Aquífero. Foi estimada a idade de cerca de 15 anos para a água da nascente de 7Fontes.

**Tabela 7.1** – Resultados analíticos para Trítio nas águas amostradas.

<b>Amostra</b>	<b>Resultados</b>	<b>± 1σ</b>
	± 0.8 T.U.	
Nascente Olhos de Fervença	1.3	0.4
Furo Oliveira do bairro	1.3	0.4
Nascente 7Fontes	1.65	0.4

**Tabela 7.2** – Idades aparentes calculadas com base no isótopo Trítio.

<b>Tempo decorrido (Anos)</b>	<b>U.T</b>
0	4.5
12.32	2.25
24.62	1,125
<b>Captações</b>	<b>Idade (Anos)</b>
Nascente Olhos de Fervença	20
Furo Oliveira do bairro	20
Nascente 7Fontes	15

## 7.3 Isótopos Estáveis de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$

### 7.3.1 Razões Isotópicas e Fraccionamento

O estudo dos isótopos estáveis é feito através da variação da sua concentração relativamente ao elemento mais abundante, sendo esta definida como razão isotópica e é dada pela expressão:

$$R = \frac{\text{Abundância do isótopo raro}}{\text{Abundância do isótopo abundante}} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

R define a razão isotópica no qual é acompanhado do número de massa do isótopo em questão, e com a notação da molécula onde se encontra o isótopo. Para o isótopo  $^{18}\text{O}$  na molécula de água a razão isotópica será:

$$^{18}R(\text{H}_2\text{O}) = \frac{\text{H}_2^{18}\text{O}}{\text{H}_2^{16}\text{O}} \quad (\text{Eq. 7.5})$$

A razão isotópica difere de uma concentração isotópica pelo facto que a concentração do isótopo é dividida pela concentração total do elemento ou composto molecular.

$$\text{Concentração isotópica} = \frac{\text{H}_2^{18}\text{O}}{[\text{H}_2^{18}\text{O} + \text{H}_2^{16}\text{O}]} \quad (\text{Eq. 7.6})$$

O comportamento químico e físico dos isótopos é dado pela química clássica, como sendo igual entre os diferentes isótopos do mesmo elemento. Assim será o comportamento de moléculas com isótopos diferentes, como por exemplo a  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  e  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ . Até um certo ponto esta afirmação é real, no entanto medidas precisas efectuadas por espectrómetros de massa modernos, mostram que existem pequenas diferenças no seu comportamento. Estas pequenas diferenças são as responsáveis pelo fraccionamento isotópico (Mook, 2000). O fraccionamento pode ocorrer através da transição de um composto de uma fase para outra, pela passagem para outro composto ( $\text{CO}_2$  para um composto orgânico de uma planta por exemplo), ou pode ser observado como a diferença entre a composição isotópica de dois compostos em equilíbrio químico, e em um equilíbrio físico, como entre água líquida e vapor de água.

A diferença de massa do núcleo entre isótopos do mesmo elemento, são responsáveis por estas diferenças observadas. Como consequência destas diferenças de massa são observados os seguintes comportamentos:

1 - Isótopos ou moléculas isotópicas mais pesadas têm uma mobilidade mais baixa, visto possuírem menos energia cinética. A energia cinética das moléculas está dependente da temperatura ( $KT = \frac{1}{2}mv^2$ ), por isso para mesma temperatura e massas maiores, v terá de ser menor pois as moléculas têm de ter o mesmo valor de  $\frac{1}{2}mv^2$  independentemente da sua composição isotópica. Estas moléculas são assim caracterizadas por terem uma velocidade de difusão menor, assim como a probabilidade de colidirem com outras moléculas torna-se inferior, sendo esta a principal condição para que ocorram reacções químicas. As moléculas mais leves reagem assim, mais rápido que as moléculas mais pesadas.

2 - Os isótopos têm energias de ligação mais elevadas que as suas versões mais leves. Isto ocorre porque a parte da massa do núcleo foi convertida em energia de ligação na sua formação,

representando esta, a energia “armazenada” no núcleo para manter as partículas unidas. Núcleos com mais partículas terão energia de ligação maior, assim como os isótopos sucessivamente mais pesados de um elemento. Assim uma ligação química entre duas moléculas (em um líquido ou num cristal por exemplo) será mais forte nas que possuem a espécie isotópica mais pesada relativamente a mais leve, e será necessário um valor mais elevado de energia cinética para romper estas ligações, ou seja uma subida da temperatura. A diferença de energia de ligação entre duas moléculas com isótopos diferentes, será menor quanto maior for a temperatura, estando esta diferença de energia dependente da mesma. Este efeito provocado pelo aumento da temperatura, faz com que a partir de um determinado valor, as diferenças na energia de ligação se tornem nulas. O fracionamento será assim menor quanto maior a temperatura, até deixar de ocorrer a partir de um certo valor, estando este, dependente do isótopo e da espécie molecular onde se encontra. Em alguns casos específicos em moléculas poliatômicas, pode ocorrer o efeito inverso. As moléculas mais pesadas possuem energia de ligação menor, sendo assim mais fácil de quebrar as ligações da molécula pesada. Este efeito designa-se por efeito do “isótopo inverso” (Mook, 2000).

Existem dois tipos de fracionamento isotópico: fracionamento cinético e fracionamento de equilíbrio (ou termodinâmico). O fracionamento cinético resulta de processos físicos ou químicos irreversíveis, no qual podem incluir a evaporação de água com uma evacuação rápida deste vapor, de modo a não ficar em contacto com a mesma, e absorção ou difusão de gases (física); precipitação rápida de calcite e decaimento bacteriano de plantas (química). Estes efeitos de fracionamento são determinados essencialmente pela energia de ligação das partículas.

O fracionamento cinético não é totalmente irreversível na natureza. Na evaporação da água do mar por exemplo, o vapor de água acaba por retornar através da precipitação. O fracionamento cinético é difícil de determinar em laboratório, sendo este um dos motivos.

O fracionamento de equilíbrio ocorre numa reacção termodinâmica de equilíbrio. Se for possível obter as energias de ligação dos átomos ou moléculas, pode ser calculado o fracionamento em laboratório.

O processo de fracionamento isotópico é descrito matematicamente fazendo a comparação entre duas razões isotópicas de dois compostos antes e depois de um processo cinético, físico ou químico, ou de dois compostos em equilíbrio. A comparação consiste na razão entre as duas razões isotópicas. A mesma é designada como “factor de fracionamento” ( $\alpha$ ).

$$\alpha_A(B) = \alpha_{B/A} = \frac{R_B}{R_A} \quad (\text{Eq. 7.7})$$

O factor de fracionamento expressa a variação da razão B em relação a A.

Como efeitos de fracionamento são geralmente pequenos ( $\alpha \approx 1$ ), é por isso usado o desvio de  $\alpha$  de 1, em vez do factor de fracionamento. Este valor é dado por:

$$\epsilon_{B/A} = \alpha_{B/A} - 1 = \frac{R_B}{R_A} - 1 \quad (\times 10^3 \text{‰}) \quad (\text{Eq. 7.8})$$

O valor de  $\epsilon$  é referido como “Fracionamento”. Se  $\epsilon > 0$  houve enriquecimento de B em relação a A, e se  $\epsilon < 0$  houve empobrecimento. Por  $\epsilon$  ser um número pequeno o mesmo é dado em ‰, podendo ser usado em cálculos de fracionamento, embora um valor de 10‰ seja na realidade 0,010 ( $10/10^3$ ).

O valor do fracionamento tem a seguinte relação importante:

$$\varepsilon_{B/A} = -\varepsilon_{A/B} \quad (\text{Eq. 7.9})$$

Ou seja o fracionamento de B em relação a A, é igual ao negativo do mesmo valor, no qual corresponde o fracionamento de A em relação a B. Esta relação é útil para estabelecer o sentido do fracionamento em equilíbrio.

A abundância dos isótopos é normalmente reportada como o desvio de uma razão em relação a uma referência com uma determinada razão isotópica standard (r). Este desvio é dado por:

$$\delta_{A/r} = \frac{R_A}{R_r} - 1 \quad (\text{Eq. 7.10})$$

Assim para um isótopo específico como o  $^{18}\text{O}$ , o valor será indicado como  $\delta^{18}\text{O}$  ou só simplesmente como  $^{18}\delta$ .

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_A}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_r} - 1 \quad (\text{Eq. 7.11})$$

O valor de  $\delta$  é dado em ‰, como em  $\varepsilon$ .

Assim o valor  $\varepsilon$  representa a razão do composto B relativamente ao composto A, e o valor  $\delta$  é definido como a razão isotópica de um composto relativamente a um material standard.

O fracionamento que ocorre na precipitação em torno do planeta é muito grande, visto a condensação de vapor de água esta dependente de vários factores climatológicos e locais. Na generalidade os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  no vapor de água formado nas regiões equatoriais, tornam-se mais negativos com os sucessivos episódios de precipitação, assim como a própria precipitação. Nas regiões do Ártico e do Antártico podem ser encontrados no gelo valores de -50‰ (Mook, 2000).

Os efeitos gerais de fracionamento natural do valor de  $\delta^{18}\text{O}$  a nível global para a precipitação são afectados pelos seguintes efeitos: latitude, altitude, continental, sazonal, e quantitativo. Os três primeiros provocam valores de fracionamento progressivamente mais negativos com o seu aumento. O efeito continental mostra valores progressivamente mais negativos à medida que a precipitação ocorre cada vez mais para o interior dos continentes. Já o efeito sazonal provoca igualmente valores mais negativos no inverno em regiões de clima temperado. O efeito quantitativo provoca valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mais negativos quanto mais intensa for a precipitação (Mook, 2000).

O oxigénio tem três isótopos estáveis, o  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ , e  $^{18}\text{O}$  com as abundâncias de 99,76, 0,035 e 0,2% respectivamente. Devido à sua baixa ocorrência, o  $^{17}\text{O}$  tem pouco valor hidrológico fornecendo pouca informação. Sendo o  $^{18}\text{O}$  o segundo isótopo mais abundante, a concentração do mesmo é determinada com maior precisão permitindo assim estudar a variação da razão  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ .

Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mostram uma variação natural de cerca de 100‰. O  $\delta^{18}\text{O}$  atinge normalmente os valores mais enriquecidos em lagos (salinos) que estão sujeitos a altos níveis de evaporação, e os valores mais baixos ocorrem em latitudes elevadas em precipitação de clima frio. Nos climas temperados a variação de  $\delta^{18}\text{O}$  não excede os 30‰. Estes valores são estudados principalmente nos sistemas  $\text{H}_2\text{O}$  (Vapor) –  $\text{H}_2\text{O}$  (Líquido) –  $\text{CaCO}_3$ .

Originalmente os valores de  $^{18}\delta\text{O}$  foram comparados em relação aos valores médios da água do mar, sendo designado como “Standard Mean Ocean Water” (SMOW). Mais tarde a “Internacional Atomic Energy Agency” (IAEA) em Viena, Áustria, reformulou um novo padrão de SMOW para o  $^{18}\text{O}$ , assim como para o  $^2\text{H}$ , adquirindo ambos o valor zero. Este padrão passou a designar-se como “Vienna

Standard Mean Ocean Water“ (V-SMOW). A razão absoluta de V-SMOW é de  $(2005,5 \pm 0,45) \times 10^{-6}$ . Assim todos os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  na água são dados relativamente a V-SMOW (Mook, 2000).

O elemento químico Hidrogénio possui dois isótopos estáveis, o  $^1\text{H}$  e o  $^2\text{H}$  (Deutério) com uma abundância de 99,985 e 0,015% respectivamente e uma razão isotópica  $^2\text{H}/^1\text{H}$  de aproximadamente 0,00015. Esta razão possui uma variação natural de cerca de 250‰, bem maior que a variação de  $\delta^{18}\text{O}$ , sendo estas inferiores devido à sua maior massa em relação ao deutério. O fracionamento de maior importância ocorre na fase líquida e gasosa da água.

Ambos os isótopos  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  fraccionam na água por estarem presentes nas suas moléculas e possuírem diferentes pressões de vapor, sendo por isso de esperar que ocorra correlação nos seus valores. Na realidade é observada uma correlação próxima dos valores de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  na precipitação, gelo, água de superfície e na maioria das águas subterrâneas.

A relação entre os valores de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  foi encontrada por Craig (1961) e Dansgaard (1964) (*in* Mook, 2000). A relação obtida para valores de precipitação em várias partes do mundo é:

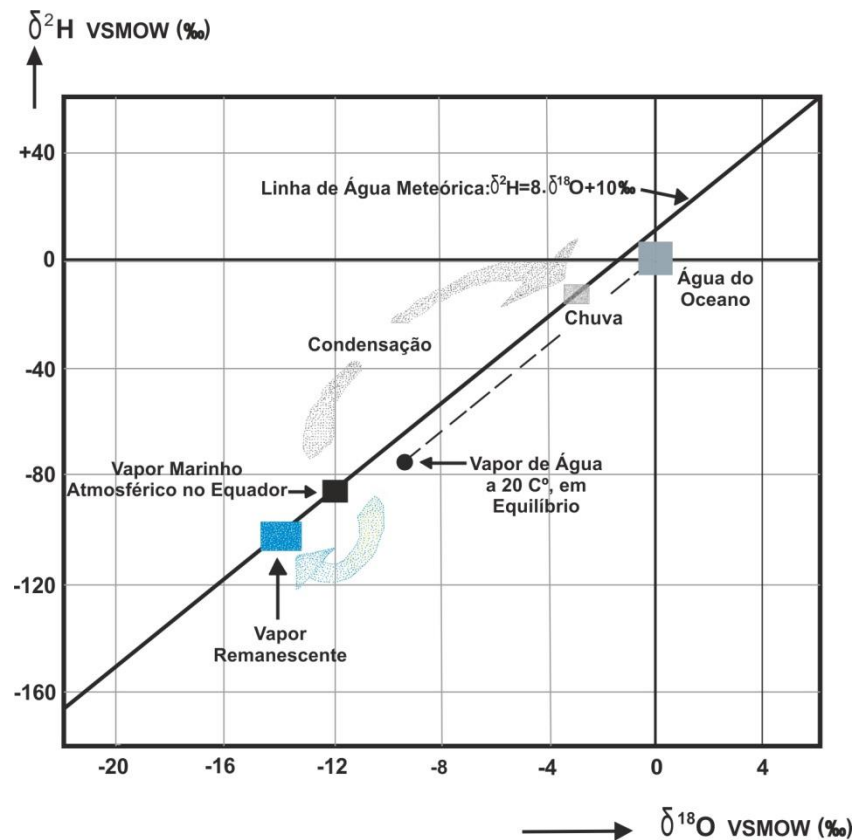
$$\delta^2\text{H} = s \times \delta^{18}\text{O} + d \quad (\text{Eq. 7.12})$$

Esta relação é representada por uma equação linear caracterizada por declive  $s=8$ , no qual o mesmo é explicado pelo equilíbrio de fracionamento dos isótopos de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  no processo de condensação da precipitação. Na equação o valor “d” é referido como o excesso de deutério (a intercepção com o eixo  $\delta^2\text{H}$ ). Este excesso é explicado pelo facto de em várias regiões do mundo e em certos períodos do ano, o valor de  $\delta^2\text{H}$  é diferente em 10‰, dependendo da humidade e das condições de temperatura da região onde ocorre a evaporação. Em certas tempestades os valores também podem diferir em 10‰. A linha recta dada graficamente por esta relação é designada por “Global Meteoric Water Line”(GMWL), e é expressa por (Figura 7.1):

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰} \quad (\text{Eq. 7.13})$$

Embora as amostras de precipitação continental tenham tendência a agrupar-se ao longo da GMWL, na realidade o valor numérico 8 e o valor de “d” não são constantes e vão depender ambos de processos climáticos locais, podendo ser encontrados grandes desvios nos dados mensais quando estações individuais são consideradas.

Os valores de precipitação no geral para latitudes e/ou temperaturas mais elevadas, encontra-se ao longo da linha com valores progressivamente mais negativos. A água do oceano sendo mais enriquecida, localiza-se abaixo da GMWL com valores de  $\approx (\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} = 0)$ . Os desvios da GMWL podem ser interpretados como precipitação que ocorreu durante climas mais frios ou quentes, ou como mudanças geoquímicas ocorridas enquanto águas subterrâneas (Craig 1961, *in* Mook, 2000).

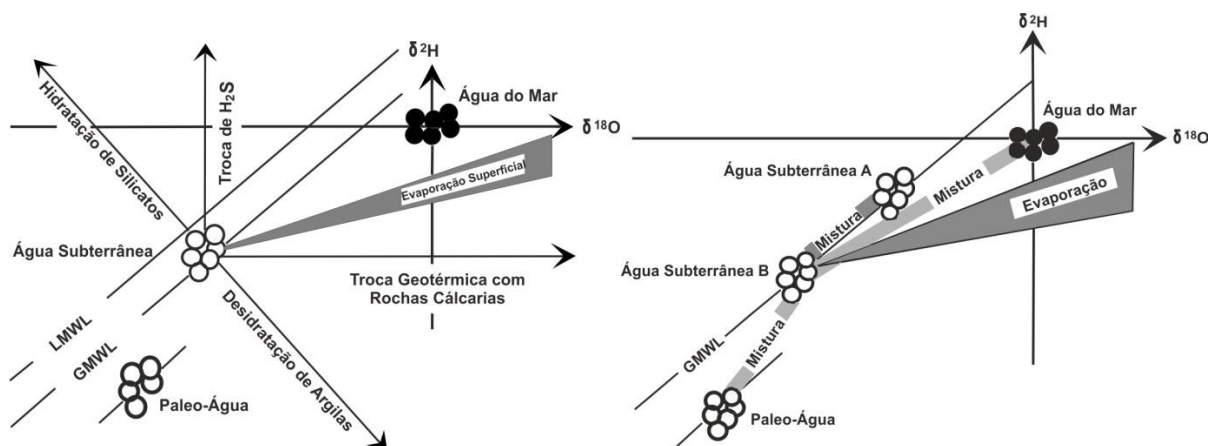


**Figura 7.1** – Diagrama com as variações naturais de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  para a água do oceano, vapor atmosférico e precipitação. O círculo negro representa o valor isotópico hipotético do vapor de água marinho em equilíbrio com a água do oceano, enquanto o quadrado negro possui valores de uma mais realista fraccionação de não equilíbrio (parcialmente cinético). O vapor marinho no equador condensa gradualmente em precipitação com valores isotópicos mais enriquecidos (fraccionação positiva), deixando para trás vapor progressivamente mais empobrecido (fraccionação negativa), adaptado de Mook, (2000).

Em alguns casos de estudos de águas subterrâneas são obtidos valores que se agrupam numa recta paralela a GWML, sendo interpretada como “*Local Meteoric line*”.

Se assumirmos que a evaporação e condensação na natureza ocorre em equilíbrio isotópico, a relação entre os dois isótopos pode ser determinada pelo fracionamento de equilíbrio entre estado líquido e de vapor ( $^2\varepsilon_v/1, ^{18}\varepsilon_v/1$ ). Como a evaporação nos oceanos é um processo de não equilíbrio parcialmente cinético, os valores observados no qual se projectam na GMWL para o vapor de água no oceano, possuem valores mais negativos dos que os experimentais obtidos em equilíbrio. Já no que se refere à precipitação, esta resulta provavelmente de um fracionamento de equilíbrio físico, sendo esta a razão pela qual a mesma se distribui ao longo da GMWL, assim como o vapor de água que resta de cada sucessiva precipitação, também se distribui ao longo da mesma.

Após a precipitação, podem ocorrer processos de fracionamento e troca isotópica no qual provocam desvios da GMWL. Estes processos incluem troca de oxigénio entre moléculas de água em filossilicatos por hidratação ou desidratação; troca de oxigénio entre rochas calcárias através da troca de  $\text{CO}_2$  vulcânico, e troca de hidrogénio através da troca de  $\text{H}_2\text{S}$  na hidratação de silicatos. Estes processos ocorrem em sistemas geotérmicos.



**Figura 7.2** – Representação dos processos que causam desvios aos valores de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  para a GMWL, adaptado de Geyh, (2000).

Os desvios podem ocorrer também a partir da evaporação, no qual provoca um enriquecimento na fase líquida (Zuber, 1983 *in* Geyh, 2000). Como a evaporação é um processo de não equilíbrio, parcialmente cinético, podem ocorrer desvios no qual os valores ocorrem em rectas de tendência com declive igual a 4, ou até mesmo em alguns casos o declive pode ter valores de 2. No entanto por vezes a evaporação pode-se resumir a uma subida dos valores ao longo da GMWL ou LMWL. A mistura de águas antigas e atuais pode igualmente provocar desvios. Já uma mistura entre águas situadas na GMWL ou LMWL, terão tendência para se projectar ao longo da mesma, com valores intermédios entre as duas águas. Para este trabalho será dada atenção particular à evaporação e mistura de águas.

Em Portugal, em diferentes localizações geográficas, foram detectados diferentes valores para o  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  (Carreira *et al.*, 2004). Foram colhidas amostras de precipitação em 5 estações meteorológicas classificadas como continentais (Vila Real, Bragança, Penhas Douradas, Portalegre e Beja) e em mais duas estações classificadas como Costeiras (Porto e Faro). As mesmas situam-se a cotas diferentes, que vão de 9 metros no litoral, a 1380 metros no interior. São as diferenças climáticas das várias localizações geográficas que levam à variação dos valores isotópicos observados.

Foram assim registados valores progressivamente mais empobrecidos nas estações situadas mais para o interior, estando os valores de cada estação individual dependentes da altitude e temperatura. Para a estação do Porto, foram registados valores de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  de -30,7 e -5,11 ‰, respectivamente. Já para a estação de Bragança foram registados os valores mais baixos com  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  de -50,0 ‰ e -7,73‰, respectivamente.

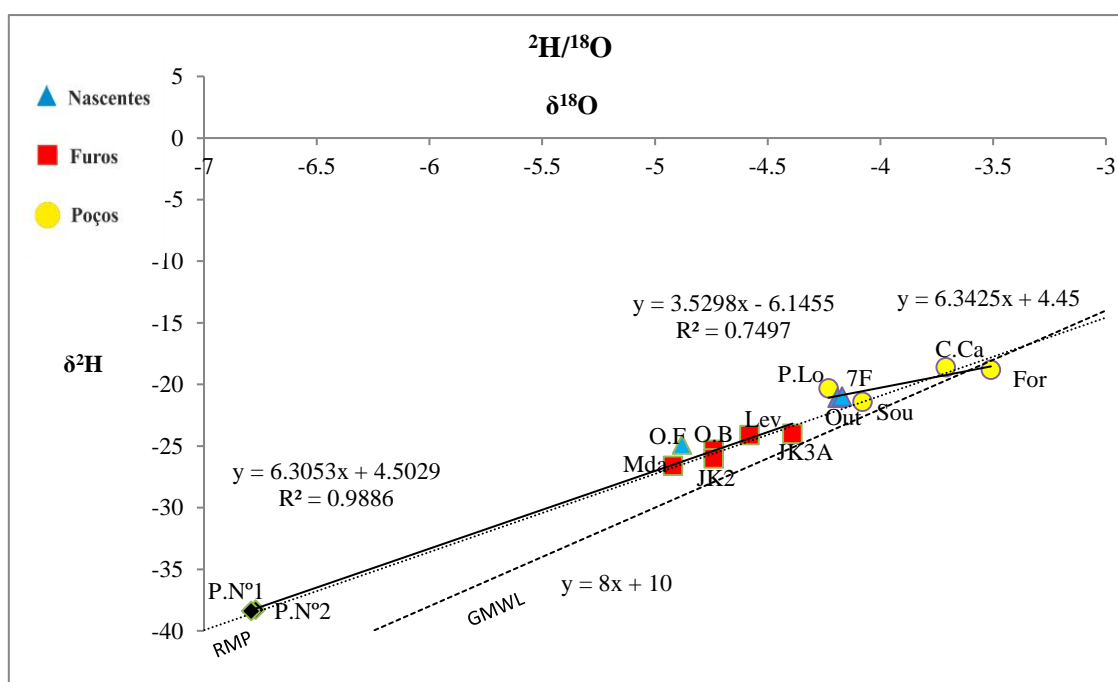
Através das análises isotópicas foi possível determinar o gradiente isotópico com a altitude no qual é usado com frequência para determinar as áreas de recarga. Foram obtidos os gradientes de  $\Delta\delta^2\text{H}$  e  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  de -1‰/100 m e -0,2 ‰/100 m, respectivamente.

## 7.4 Isótopos Estáveis de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ na Massa de Água

As razões isotópicas dos isótopos estáveis relativamente a V-SMOW colhidos para nascentes, furos, poços e precipitação apresentam-se em anexo na Tabela II.

Os valores mais baixos podem ser observados nas duas amostras de precipitação N°1 e N°2 com valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,77 e -6,70 ‰ e valores de  $\delta^2\text{H}$  de -38,3 e -38,4 ‰, respectivamente. Nas amostras de nascentes furos e poços, o furo da Mealhada apresenta os valores mais baixos com  $\delta^{18}\text{O}$  de -4,92‰ e  $\delta^2\text{H}$  de -26,6‰. Já os valores mais altos verificam-se para o poço de Fornos com valores de  $\delta^{18}\text{O}$  = -3,51 ‰ e  $\delta^2\text{H}$  = -18,8‰.

Para a análise dos isótopos estáveis, não foi possível determinar uma recta meteórica local para a precipitação. Por isso usou-se como recta local, a Recta Meteórica de Portugal (RMP) (Carreira *et al*, 2004), em conjunto com GMWL. Os resultados apresentam-se na Figura 7.3.



**Figura 7.3** – Projecção dos valores obtidos nas análises dos isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ . RMP é a Recta Meteórica de Portugal., GMWL é a Recta Meteorica Global.

Pode-se observar que todos os valores têm tendência para se projectar na RMP formando três grupos distintos: o primeiro e com valores mais empobrecidos de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$ , é dado pelos valores das duas amostras referentes a precipitação. O segundo grupo, que se encontra muito mais enriquecido, inclui todos os furos em conjunto com a nascente de Olhos de Ferveença. O terceiro grupo corresponde aos valores com maior enriquecimento, e está representado por todos os poços, em conjunto com as nascentes do Outeiro e 7Fontes.

Para o segundo grupo o furo da Mealhada apresenta os valores mais baixos, seguido por ordem crescente, pela nascente de Olhos de Ferveença, Oliveira do Bairro, JK2, Levira, e JK3A. Aparentemente estes valores seguem a RMP. Visto os dados da precipitação serem poucos, temos que

considerar que os valores da precipitação ao longo da área do Sistema Cársico da Bairrada, vão ter uma variabilidade causada pelo efeito, sazonal, continental, e com menos importância, o efeito da altitude (visto as diferenças de altimetria em relação ao relevo do cársico não serem superiores a 100 metros). As duas amostras de precipitação foram recolhidas na zona mais interior do Cársico da Bairrada, tendendo assim para os valores mais baixos. Assim a variabilidade de valores para o segundo grupo que se encontram ao longo da RMP, poderá ser resultado de uma mistura de águas, como consequência dos episódios sucessivos de precipitação com diferentes valores de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  ao longo do ano.

O furo da Mealhada o qual possui valores mais baixos, poderá ter como causa a influencia das águas provenientes do Sistema Aquifero do Luso, no qual se situa mais no interior do continente e a altitudes mais elevadas, possuindo assim no geral valores mais empobrecidos de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$ .

O terceiro grupo possui os valores mais enriquecidos em isótopos pesados. O poço Penha da Lomba agrupa-se com a nascente de 7Fontes, Outeiro e poço de Souselas. Os poços de Casal de Cadima e Fornos, agrupam-se e mostram valores mais enriquecidos, com Fornos no valor máximo. O facto de todos os poços se agruparem com valores mais enriquecidos em isótopos pesados, com uma separação de valores significativa do segundo grupo, leva a crer que este enriquecimento deverá ser causado por evaporação nos poços que se encontram a céu aberto, dando lugar a um enriquecimento por evaporação. Este enriquecimento não é igual para todos os poços, mas os mesmos estão sujeitos a factores diferentes de evaporação e episódios de precipitação no qual podem criar a variabilidade de valores observada para o terceiro grupo. A nascente do Outeiro, está incluída neste grupo, provavelmente por as suas águas terem sido colhidas em uma lagoa perto da nascente.

Assim a evaporação aparentemente cria um enriquecimento que provoca a subida dos valores ao longo da RMP. Para tentar reforçar a ideia que os poços sofreram enriquecimento por evaporação fez-se uma correlação entre o  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  com a altitude. Os resultados apresentam-se nas Figuras 7.4 e 7.5.

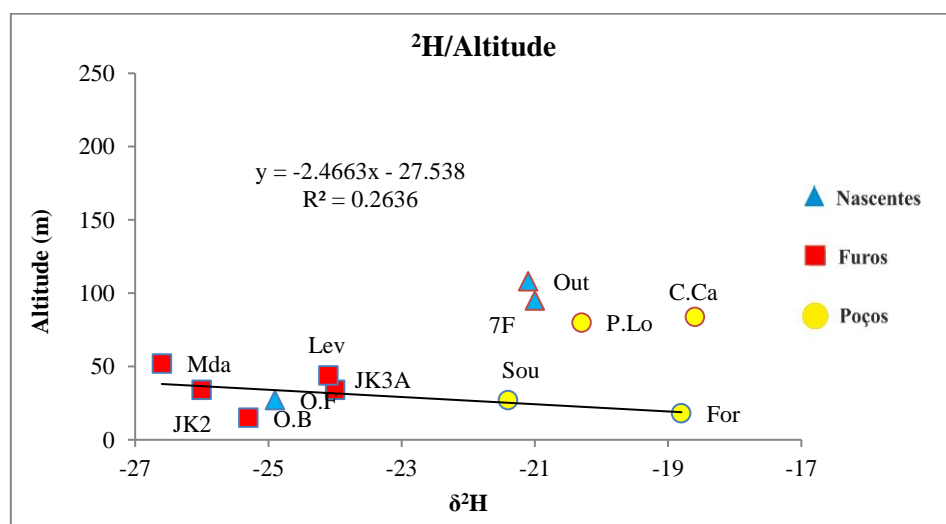


Figura 7.4 – Gráfico com a relação entre a altitude e  $\delta^2\text{H}$ .

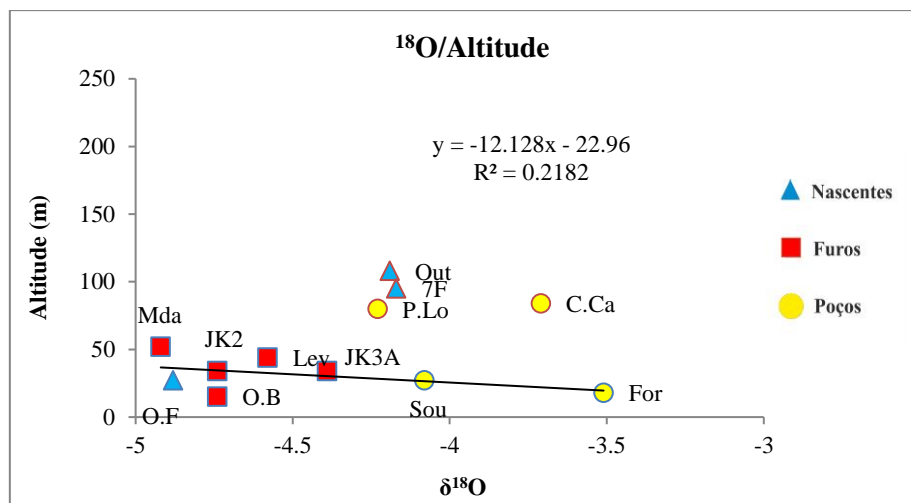


Figura 7.5 - Gráfico com a relação entre a altitude e  $\delta^2H$ .

A variação de  $\delta^2H$  e  $\delta^{18}O$  com a altitude mostram fraca ( $R^2=0,26$  e  $R^2=0,21$ ) provavelmente em consequência da possível evaporação ocorrida na água dos poços (valores isotópicos mais pesados). Todos os furos em conjunto com a nascente de Olhos de Fervença agrupam-se nos valores mais negativos. Em ambas as linhas de tendência encontradas (Figura 7.4 e 7.5), os valores mais elevados observam-se nos poços de Souselas e Fornos, devido ao seu alto enriquecimento conjuntamente com uma altitude que não excede os 30 m. Já para os poços de Casal de Cadima, Penha da Lomba, nascente do Outeiro, e nascente de 7Fontes, os valores não se inserem na linha de tendência, mostrando valores igualmente enriquecidos para uma altitude significativamente mais alta, apoiando assim o enriquecimento por evaporação para estas captações. De um modo geral as diferenças de valores isotópicos para região no que diz respeito ao efeito da altitude são muito baixas, visto a variação da altitude não ser superior a 100 metros. Assim este efeito torna-se pouco significativo.

Poderá existir também uma relação relativamente ao segundo e terceiro grupo no que diz respeito às formações de onde as águas provêm. Como foi mencionado anteriormente em relação a figura 6.6 existe a possibilidade de os poços e nascente do Outeiro, pertencerem a formação mais superficial dos calcários de Lameda e os furos, conjuntamente com nascente de Olhos de Fervença, captarem a formação das Camadas de Coimbra. Visto ocorrer uma separação nos valores isotópicos nestas mesmas captações, poderá ser possível que exista áreas de recarga, que não são comuns as duas formações, podendo assim existir uma tendência para infiltração de precipitação mais enriquecida para uma formação que outra e vice-versa.

A nascente 7Fontes apresenta-se no 3º grupo, estando entre os valores mais enriquecidos. A amostra desta nascente foi colhida directamente da saída de água, não tendo sofrido assim evaporação. No entanto a mesma apresenta valores semelhantes a águas expostas a evaporação. A explicação poderá estar, nas formações de depósitos de terraços do Quaternário, onde a nascente se localiza, como já foi mencionado anteriormente. Segundo Allison *et al.* (1982, in Geyh, 2000), as águas subterrâneas que se encontram em formações detríticas podem sofrer fracionamento isotópico por evaporação, no qual a mesma vai depender da dimensão da granularidade. O fracionamento por evaporação em formações detríticas, segundo Sonntag *et al.* (1985 in Geyh, 2000), está dependente dos seguintes factores:

- o declive da linha de evaporação de  $\delta^2H/\delta^{18}O$  aumenta com o aumento da humidade na zona não saturada, e com o aumento da granularidade;

- o declive da linha de evaporação para granularidades maiores que 1mm equivale ao fracionamento de massas de água expostas directamente a atmosfera.

Assim, as formações do Quaternário quando expostas à evaporação, o fracionamento isotópico irá ser equivalente aos dos poços a céu aberto, caso a granularidade seja superior a 1 mm, explicando assim a razão pela qual a nascente 7Fontes se insere no terceiro grupo.

O enriquecimento nestes sistemas normalmente forma um pico de enriquecimento isotópico até profundidades entre 20 a 30 metros, decrescendo exponencialmente para profundidades maiores. Visto estas formações não se apresentarem com espessura muito elevada, uma vez que outras formações afloram a altitudes inferiores, mas muito baixas, em relação as formações do Quaternário, o enriquecimento observado é assim concordante com este facto.

Para além de se considerar que a evaporação provocou um enriquecimento ao longo da RMP para o terceiro grupo, pode-se de outra forma considerar uma recta de evaporação independente. A recta de tendência para este, pode ser observada na Figura 7.3. Possui uma correlação de  $R^2=0,75$ , e um declive de 3,5. Se se considerar uma possível recta local para a área do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada paralela ou semi-paralela à GMWL, e tendo em conta que o declive da recta de tendência está em concordância com o declives obtidos por evaporação a partir da GMWL na Figura 7.2, é possível que esta linha se apresente com desvio à uma possível recta local. No entanto, devido a dados insuficientes não é possível de alguma forma comprovar que esta linha de tendência tenha alguma relação com a evaporação.

## 8 Integração de Resultados e Conclusões

A Massa de Água do Cársico da Bairrada é caracterizada por apresentar fácies bicarbonatada cálcica, com excepção da nascente de 7Fontes que apresenta características de uma água sulfatada cloretada, cálcica ou magnésiana.

Os parâmetros físico-químicos distinguem dois grupos de águas: um grupo que engloba todos os poços a céu aberto, juntamente com a nascente do Outeiro, com águas mais mineralizadas; e um segundo grupo com os furos mais profundos e a nascente de Olhos de Fervença com águas menos mineralizadas. Destes dois grupos destaca-se a nascente 7Fontes, a qual se encontra na origem de praticamente todas as linhas de tendência obtidas no tratamento de dados das amostras, podendo assim ser considerada como água inicial ou representativa da mesma.

A análise do pH com a alcalinidade revela que se distinguem duas linhas de tendência no qual se inserem os dois grupos distinguidos. A primeira linha engloba todos os furos e a nascente de Olhos de Fervença, possui valores mais baixos de alcalinidade, mostrando assim a possibilidade destas águas dissolverem carbonatos em um sistema fechado a  $CO_{2(g)}$ . O furo de Levira poderá dever a sua baixa alcalinidade porque a mineralização pode estar a ser controlada pela dissolução dos arenitos do Carrascal. A piezometria da região indica a possibilidade de transferência de águas do sistema aquífero Cársico da Bairrada para o Cretácico na zona Sul, no qual foi estimada em cerca de  $1 \text{ hm}^3/\text{ano}$ . Esta transferência poderá contribuir, assim, para um enriquecimento em  $HCO_3^-$ .

A relação da condutividade com o  $HCO_3^-$  e a dureza em conjunto com o índice  $rCa^{2+}/rHCO_3^-$ , mostram que a mineralização das águas analisadas está dependente de uma interacção água-rocha de formações de natureza carbonatada, principalmente constituídas por carbonato de cálcio.

A correlação da sílica com a condutividade mostra duas linhas de correlação que podem estar relacionadas com formações diferentes. Comparando as amostras pertencentes a área do Cársico da Bairrada, com excepção do furo da Mealhada, para as duas linhas evolutivas, a progressão de valores é mais elevada para a linha que contem os furos, e mais baixa para a que contem os poços. As diferenças poderão estar na origem das formações atravessadas. Os furos poderão atravessar a unidade mais produtiva do Jurássico inferior, designadas por Camadas de Coimbra, a qual consiste em calcários compactos com alternâncias de calcários com margas xistificadas, enquanto os poços podem estar a captar águas mais relacionadas com os Calcários de Lemedo, a segunda unidade mais produtiva do Jurássico inferior, constituída por alternâncias de calcários argilosos.

No grupo das captações por furo destaca-se o furo da Mealhada, que apesar de se localizar numa das zonas de descarga do sistema aquífero, possui água menos mineralizada. A baixa mineralização pode dever-se a circulação da água no aquífero em sistema fechado ou a mistura com águas hipossalinas do sistema aquífero Luso (A12). Caso esta mistura ocorra seria de esperar um pH mais baixo, tendo em consideração o pH baixo (5,64) das águas do Luso. A calcite dissolvida tem a capacidade de atenuar o pH (Capacidade Buffer) resistindo a sua alteração em ambos os sentidos, explicando assim a hipótese de ocorrer diluição, sem alteração significativa do pH.

O índice  $rNO_3^-/rSO_4^{2-}$  mostra que as captações mais superficiais poderão possuir alguma contaminação.

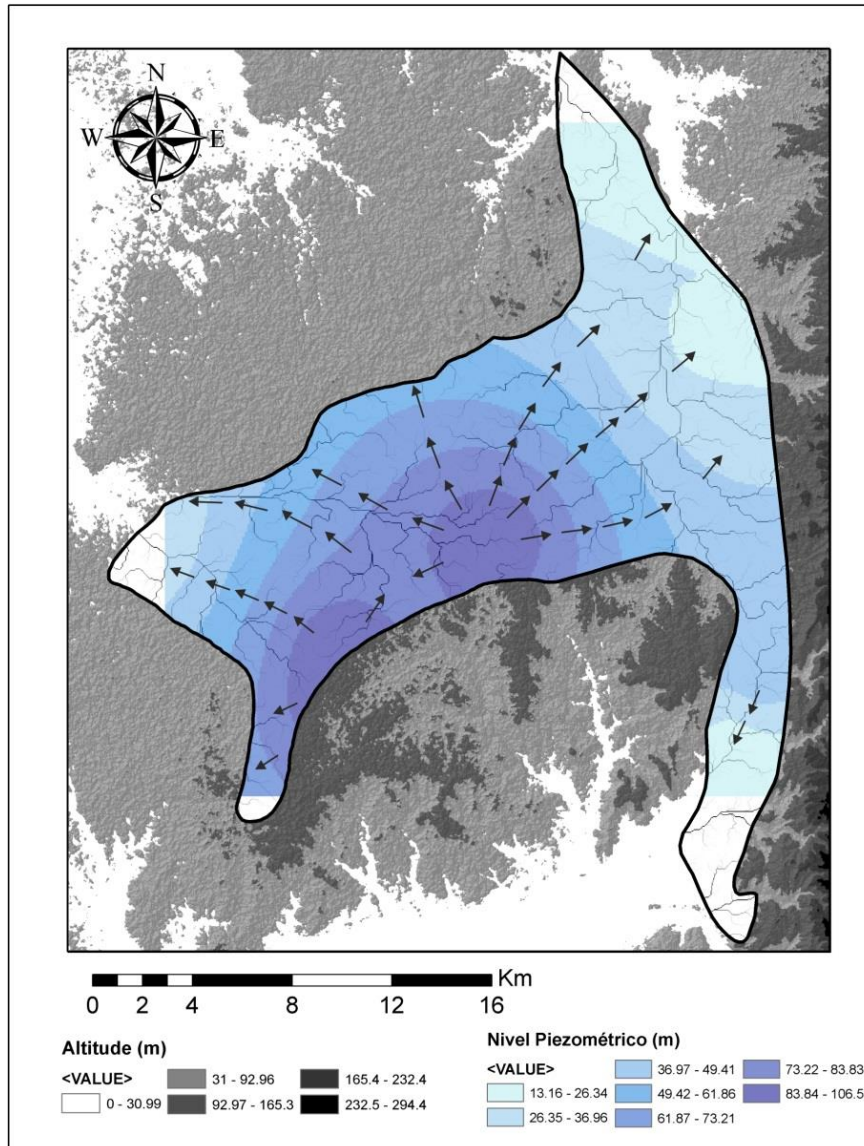
Os índices de saturação da água em relação a diversas fases sólidas e gasosas revelam que quase todas estão ou em equilíbrio ou próximo com a calcite e calcedónia. Realçam-se as excepções das águas dos furos JK3A, Levira e Mealhada as quais apresentam IS muito baixos indicando sub-saturação neste mineral. A água do poço de Fornos constitui também uma excepção com valores de IS elevados em relação à calcite, aragonite e calcedónia.

A modelação hidrogeoquímica da dissolução de calcite em sistema fechado e em sistema aberto, mostrou que é possível que a água recolhida no poço de Casal de Cadima represente a circulação no aquífero carbonatado em sistema aberto, e as águas da nascente Olhos de Fervença e do furo da Mealhada, reflitam uma circulação no aquífero carbonatado com dissolução em sistema fechado.

O estudo dos isótopos estáveis  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$  mostra que as águas do Sistema aquífero Cársico da Bairrada têm origem meteórica, com alguma evaporação na zona de recarga e/ou descarga mais próxima do litoral do que a localização das amostras de chuva recolhidas (Zona da Mealhada). As águas dos poços em conjunto com a nascente do Outeiro e nascente 7Fontes formam um grupo de águas mais enriquecido em isótopos pesados que se projecta sobre a recta de águas meteóricas. Este enriquecimento deverá ser proveniente de fenómenos de evaporação. Conclui-se que a nascente 7Fontes se encontra incluída neste grupo pode descarregar um aquífero arenoso de depósitos do Quaternário, o qual poderá estar sujeito do efeito de enriquecimento isotópico por evaporação.

A superfície piezométrica do Sistema aquífero acompanha o relevo da região. A piezometria mais elevada localiza-se na zona centro Sul do sistema, próximo de Cantanhede. As duas zonas mais elevadas na topografia apresentam uma localização e orientação aproximada ao anticlinal de Cantanhede. De certo modo esta estrutura poderá estar a condicionar a circulação das águas, visto que se pode observar que as linhas de fluxo têm tendência para se afastar das áreas de recarga em duas direcções distintas, para a zona Este e Oeste. O mapa piezométrico da Figura 8.1 mostra que estas zonas de topografia e piezometria mais elevada poderão pertencer a zonas de recarga principais do sistema, distribuindo a água da precipitação nas direcções das linhas de fluxo por todo o sistema, para NW, N e NE. Deste modo o sistema, a ocidente, descarrega para NW para a zona das exurgências de

Olhos de Fervença, para a zona oriental descarrega na zona na nascente de Arcos perto de Anadia, e na zona dos furos JK2 e JK3A. É possível também observar uma linha de fluxo que se dirige N-NW na zona central do Cársico da Bairrada. Esta linha de fluxo poderá representar a transferência de águas que se estima ocorrer para o sistema aquífero cretácico de Aveiro, visto a mesma não se dirigir para nenhum dos sectores oriental e ocidental do Cársico da Bairrada

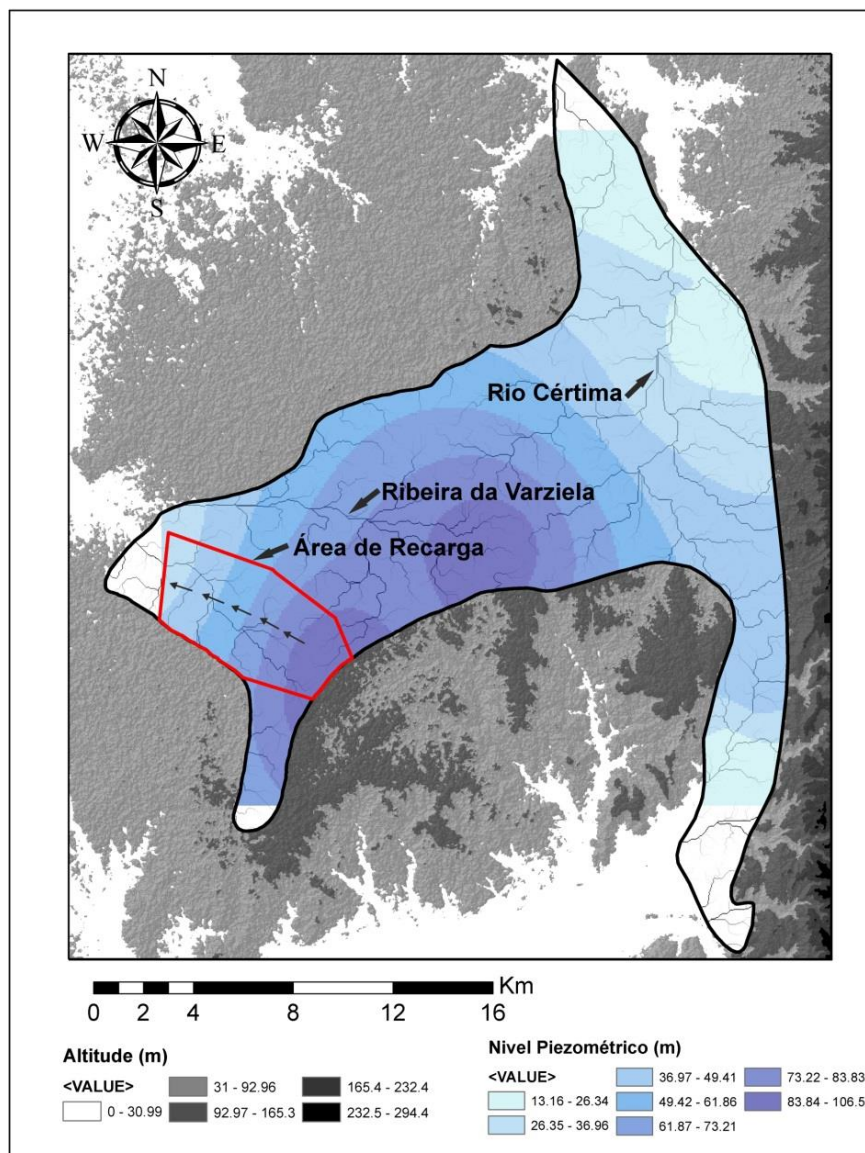


**Figura 8.1** – Piezometria e linhas de fluxo subterrâneo estimado por interpolação das cotas piezométricas medidas no Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, sobre carta altimétrica.

De modo a tentar compreender se as entradas de água são semelhantes as saídas no sistema aquífero, foi delimitada uma área no sector Oeste, correspondente à área onde as linhas de fluxo subterrâneo convergem para a nascente Olhos de Fervença (Figura 8.2). A delimitação da área foi efectuada através do software ArcGis 10.4, onde se obteve para a sua dimensão um valor de 29,2449938 km<sup>2</sup>. Considerando um valor de precipitação média anual de 988 mm/ano (Sub-bacia hidrográfica de Lis), na área delimitada o volume de água disponível para escorrência superficial e infiltração será cerca de 28894054 m<sup>3</sup>/ano.

O volume de água captado na zona da nascente Olhos de Fervença é da ordem de 215 L/s (total de 8 captações; ([www.aguas.ics.ul.pt/coimbra\\_fervenca.html](http://www.aguas.ics.ul.pt/coimbra_fervenca.html)), correspondendo ao caudal captado de 6.780.240 m<sup>3</sup>/ano, verificando-se uma diferença de 22113814 m<sup>3</sup>/ano entre o valor de água disponível para infiltração e o volume captado. Considerando a inexistência de outras descargas desta zona do sistema aquífero, esta diferença representa uma taxa de recarga de 23%, correspondente a 227 mm/ano de recarga na Massa de Água Cársico da Bairrada.

Podemos no também admitir que a Massa de Água Cársico da Bairrada poderá representar uma reserva considerável de água, com base no facto das suas águas terem a idade aproximada de 20 anos.



**Figura 8.2** – Área delimitada para o cálculo da recarga no sector Oeste do Sistema Aquífero Cársico da Bairrada, com descarga na zona da nascente Olhos de Fervença.

Conclui-se com o cálculo da recarga efectuado, que a massa de água Cársico da Bairrada apresenta boas hipóteses de conter reservas significativas de água, no qual um posterior estudo deste aquífero para determinar com mais precisão os parâmetros estudados neste trabalho de investigação, poderá ser uma mais-valia, no que diz respeito ao conhecimento das reservas de água em Portugal continental.

## 9 Bibliografia

Almeida, C., Mendonça, J.L., Jesus, M.R., Gomes, A.J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Lisboa: Centro de Geologia da FCUL e Instituto da Água. 661 p.

APA (2016). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica. Parte 2 – Caracterização e diagnóstico. Região Hidrográfica do Vouga Mondego e Lis. (RH4)*. 174p.

ARH (2012). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis integrados na região Hidrográfica 4, Caracterização Geral e Diagnóstico, 1.2 – Climatológica. Parte 2*. Ministerio da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território, 143 p.

Barbosa, B.P. (1981). *Notícia Explicativa da Carta geológica de Portugal à escala 1:50000, Folha 16-C Vagos*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 60 p.

Barbosa B.P., Soares A.F., Rocha R.B., G.Manupella.; M.H. Henrique.; (1988). *Notícia Explicativa da Carta geológica de Portugal à escala 1:50000, Folha 19-A Cantanhede*. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 46 p.

Calçada, I.O. (2016). *Metodologias Utilizadas no estudo do Escoamento em Aquíferos Cársicos e o Caso Prático da Captação do Olho de Mira (Maciço Calcário de Estremenho)*. Dissertação apresentada a Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia Aplicada, especialidade em Hidrogeologia, 154 p.

Carreira, P.M., P.Valerio, D.Nunes, M.F.Araújo, (2004). *Aquatic Forum. Isotopes in Enviromental Studies. Temporal and Seasonal Variations of Stable Isotopes ( $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$ ) and Tritium in Precipitation over Portugal*. International Atomic Energy Agency. Monaco, 710 p.

Geyh, M.A., Amore, F.D., Darling, G., Paces, T., Pang, Z., Silar, J. (2000) *Enviromental Isotopes in the Hidrological Cycle. Principles and Applications*. Volume IV. IAEA, Hannover, 424 p.

Langmuir, D. *Aqueous Enviromental Geochemistry*. 1<sup>st</sup> edition. Upper Sadlle River, Nj 07458: Prentice Hall, (1997). ISBN 978-0023674129.

Mook, W.G., de Vries, J.J. (2000). *Enviromental Isotopes in the Hidrological Cycle. Principles and Applications*. Volume I. IAEA, Paris, 164 p.

Parkhurst, D.L., and Appelo, C.A.J. (2017). Phreeqc Interactive. version 3. Disponibilidade de acesso: [https://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc.v1/index.html](https://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc.v1/index.html);

### Web List:

ICS - Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa. Acedido em: [http://www.aguas.ics.ul.pt/coimbra\\_fervenca.html](http://www.aguas.ics.ul.pt/coimbra_fervenca.html);

## 10 Anexos

Tabela I – Valores de temperatura, pH e Conductividade eléctrica medidos *in situ*.

Captações	Parâmetros		
	Temperatura (C°)	pH	Conductividade (µs/cm)
Nascente O.fervença (218/45)	16,6	7,31	517,1
Furo O.Do Bairro (197/1)	16,4	7,17	620
Nascente7 Fontes	17,5	5,3	252,2
Furo Anadia JK2 (208/4)	17,7	7,22	697
Furo Anadia JK3A	16,1	7,0	617,2
Furo de Levira	16,8	6,37	426,9
Furo Mealhada (219/277)	16,2	7,05	367,5
Poço de Casal de Cadima	13,2	6,98	804,4
Nascente Outeiro	13,8	6,9	529,4
Poço de Penha da Lomba	14,7	7,01	598,3
Poço de Souselas	15,1	6,73	730
Poço de Fornos	13,0	7,06	965,8

Tabela II – Resultados obtidos das análises físico-químicas realizadas no IST.

		Captações									
Parâmetros Físico-Químicos	O.F	O.B	7F	JK2	JK3A	Lev					
pH	7.53 (21 C°)	7.46 (21C°)	6.03 (21C°)	7.44 (19 C°)	7.32 (19 C°)	7.02 (18 C°)					
Condutividade (µs/cm)	440 (20 C°)	517 (20 C°)	228 (20 C°)	600 (20 C°)	533 (20 C°)	385 (20 C°)					
Resistividade (ohm.cm)	2.27E+03	1.93E+03	4.39E+03	1.67E+03	1.88E+03	2.60E+03					
Alcalinidade Total CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	181	190	38	194	168	112					
Dureza CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	243	289	85	316	280	153					
Sílica SiO <sub>2</sub> (mg/L)	11	10	2.9	12	11	9.5					
Oxidabilidade O <sub>2</sub> (mg/L)	1,0	<1.0	1	<1.0	<1.0	<1.0					
Resíduo seco (mg/L)	304	368	135	407	355	242					
Mineralização total (mg/L)	412	481	158	522	455	308					
<b>Aniões</b>											
Bicarbonato HCO <sub>3</sub> (mg/L)	221	232	46.3	236	205	137					
Cloreto (mg/L)	22	26	17	23	19	23					
Fluoreto (mg/L)	0.1	0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1					
Nitrato NO <sub>3</sub> (mg/L)	4.4	11	17	7.9	6.8	30					
Nitrito NO <sub>2</sub> (mg/L)	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010					
Sulfato SO <sub>4</sub> (mg/L)	48	84	30	118	105	34					
<b>Catiões</b>											
Azoto amoniacal NH <sub>4</sub> (mg/L)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05					
Cálcio (mg/L)	76	75	25	85	67	52					
Ferro (mg/L)	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	0.031	<0.010					
Magnésio (mg/L)	13	25	5.4	25	28	5.4					
Potássio (mg/L)	2	1.9	0.9	1.6	1.7	2.9					
Sódio (mg/L)	14	16	13	13	11	14					

Parâmetros Físico-Químicos	Captações						
	Mda	C.Ca	Out	P.Lo	Sou	For	
pH	7.56 (18 C°)	7.34 (17 C°)	7.49 (17 C°)	7.49 (17 C°)	7.19 (17 C°)	7.45 (16 C°)	
Condutividade (µs/cm)	253 (20 C°)	636(20 C°)	440(20 C°)	504 (20 C°)	587(20 C°)	751 (20 C°)	
Resistividade (ohm.cm)	3.95E+03	1.57E+03	2.27E+03	1.98E+03	1.70E+03	1.33E+03	
Alcalinidade Total CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	89	256	234	240	300	462	
Dureza CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	102	371	256	294	352	469	
Sílica SiO <sub>2</sub> (mg/L)	6.5	9	5.3	6.9	8	15	
Oxidabilidade O <sub>2</sub> (mg/L)	<1.0	2.8	1.3	<0.1	<1.0	2.2	
Resíduo seco (mg/L)	149	450	294	354	426	565	
Mineralização total (mg/L)	201	605	435	498	607	843	
<b>Aniões</b>							
Bicarbonato HCO <sub>3</sub> (mg/L)	108	313	285	292	366	563	
Cloreto (mg/L)	16	28	16	20	24	34	
Fluoreto (mg/L)	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Nitrato NO <sub>3</sub> (mg/L)	2.5	35	4.7	25	20	<0.3	
Nitrito NO <sub>2</sub> (mg/L)	<0.010	0.49	0.012	<0.010	<0.010	<0.010	
Sulfato SO <sub>4</sub> (mg/L)	20	59	18	35	41	20	
<b>Catiões</b>							
Azoto amoniacal NH <sub>4</sub> (mg/L)	<0.05	0.7	<0.05	<0.05	<0.05	0.43	
Cálcio (mg/L)	26	119	91	93	123	170	
Ferro (mg/L)	0.32	0.015	0.022	<0.010	<0.010	0.43	
Magnésio (mg/L)	9	18	7.1	15	11	11	
Potássio (mg/L)	1.9	2.8	0.67	1.1	1.6	6.8	
Sódio (mg/L)	11	20	6.8	9.3	12	22	

**Tabela III – Resultados das análises de isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ .**

<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{18}\text{O}(\text{‰})</math></b>	<b><math>\delta^2\text{H}(\text{‰})</math></b>
Nascente O. Fervença (218/45)	-4,88	-24,9
Furo Oliveira do Bairro (197/1)	-4,74	-25,3
Furo JK2 - Anadia (208/4)	-4,74	-26
Furo JK3A - Anadia (208/2)	-4,39	-24
Furo de Levira	-4,58	-24,1
Furo Mealhada (219/277)	-4,92	-26,6
Poço Casal de Cadima	-3,71	-18,6
Nascente do Outeiro	-4,19	-21,1
Poço de Penha da Lomba	-4,23	-20,3
poço de Souselas	-4,08	-21,4
Poço de Fornos	-3,51	-18,8
Nascente 7 Fontes	-4,17	-21
Recolha de Precipitação Realizada Junto ao Furo JK2 - Anadia	-6,77	-38,3
Recolha de Precipitação Realizada Junto ao Furo 219/277 - Mealhada	-6,79	-38,4

