

# Avaliação de recursos hídricos subterrâneos através de análise de hidrogramas e o abastecimento público do Concelho de Manteigas (Centro de Portugal)

## *Groundwater resources assessment using hydrograph analysis and the public water supply of the Manteigas County (Central Portugal)*

J. L. Mendonça<sup>1</sup>, F. Serranito<sup>2</sup>, P. Fontes<sup>2</sup>, N. Reis<sup>2</sup>, P. Alves<sup>2</sup> e J. Duarte<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hidrogeólogo, consultor independente, Membro da APRH n.º 254, lopomend@sapo.pt

<sup>2</sup> EPAL- Empresa das Águas Livres, S.A., Lisboa, Portugal

**RESUMO:** O abastecimento de água ao concelho de Manteigas faz-se exclusivamente com origem em emergências de águas subterrâneas localizadas nas encostas que delimitam o vale do rio Zêzere. O abastecimento é totalmente gravítico. A área do concelho e as captações localizam-se no Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE). Numa geomorfologia de montanha, ocorrem granitos e rochas metassedimentares ante-ordovícicas (Grupo das Beiras do Supergrupo Dúrico-Beirão) e depósitos quaternários glaciários, fluviais e de vertente. As captações drenam aquíferos descontínuos daquelas rochas duras e o regime do caudal segue o ciclo anual das precipitações. Num contexto de grande complexidade hidrológica e hidrogeológica e de falta de dados, na avaliação dos recursos hídricos é utilizado um método de decomposição dos hidrogramas anuais da estação hidrométrica de Manteigas através do programa de computador WHAT. A separação do caudal de base permite estimar os recursos hídricos subterrâneos renováveis. A estação hidrométrica localiza-se alguns quilómetros a montante da saída do vale glacial do rio Zêzere. Os dados calculados são extrapolados para algumas bacias de afluentes daquele rio localizadas a jusante e de onde não havia prévia informação hidrogeológica e estimativa dos recursos hídricos. Na bacia do vale glacial do Zêzere, há concordância entre os valores calculados pela análise de hidrogramas e os determinados pelo modelo de balanço sequencial Visual Balan.

**Palavras-chave:** abastecimento público de água, recursos hídricos subterrâneos, análise de hidrogramas, caudal de base, recarga das águas subterrâneas, modelo WHAT, hidrogeologia de zonas montanhosas, hidrogeologia das rochas duras, Serra da Estrela (Centro de Portugal).

**ABSTRACT:** The water supply of the Manteigas County, Central Portugal, is exclusively supported by groundwater springs on the slopes of the Zêzere river valley. The transport of water is totally gravity powered. The area of the Manteigas County and the springs are located in the Serra da Estrela Natural Park. Poorly weathered granitic and preordovician metasedimentary rocks (Beiras Group, Dúrico-Beirão Supergroup) and some fluvial and glacial quaternary deposits occur in this mountainous region. The springs are fed by hard rock discontinuous aquifers. They generally suffer a decrease in flow and some of them dried up in the warm and dry season. In the context of great complexity of the hydrological system itself and scarcity of experimental data, the best solution for the assessment of the sustainable groundwater resources is possibly to use black-box models. In this study, the separation of the base flow from the varying streamflow hydrographs of the Manteigas gauging station is performed by the digital Eckhardt filter incorporated into the Web based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) system. The streamflow gauging station is located some kilometers upstream of the outlet of the Zêzere river glacial valley. The base flow is used to estimate the amount of recharge to the discontinuous aquifers. The results of the hydrograph analysis are carefully extrapolated for catchments of subsidiary rivers downstream the Manteigas gauging station where there was no previous hydrogeological knowledge and groundwater resources assessment. There is no important discrepancy between the results of the hydrograph analysis and the sequential balance analyses calculation by the Visual Balan model at the Manteigas gauging station basin.

**Keywords:** Manteigas village water supply, groundwater resources, hydrograph analysis, baseflow separation, groundwater recharge, WHAT model, mountain hydrogeology, hard-rock hydrogeology, Serra da Estrela (Central Portugal).

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 38, Nº 2, 63-79, dezembro de 2017.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh38n2-cti3

## 1. INTRODUÇÃO

O abastecimento de água ao concelho de Manteigas faz-se exclusivamente com origem em águas subterrâneas de nascentes, minas e três furos horizontais localizados nas encostas que delimitam o vale do rio Zêzere, em pleno coração do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE). É constituído por três subsistemas de abastecimento autónomos: Vale de Amoreira, Sameiro e Manteigas. Em todos os subsistemas, o transporte da água a partir das captações é integralmente gravítico.

O caudal destas captações tem variações sazonais que seguem o ciclo anual das precipitações: caudal elevado no período frio e húmido, que ultrapassa a capacidade de transporte e a procura, e caudal bastante mais reduzido no verão que, nalguns anos de maior secura, provoca dificuldades à gestão do sistema de abastecimento.

De um modo geral, pode considerar-se que os recursos hídricos subterrâneos constituem a fração dos recursos hídricos totais que passa pela zona saturada e que pode ser extraída ou explorada antes ou quando do regresso ao ramo superficial do ciclo hidrológico (recursos hídricos subterrâneos renováveis).

Com exceção do território do núcleo de captações do vale glacial do rio Zêzere, que fazem parte do subsistema de Manteigas, há muito pouca ou nula informação sobre as condições hidrogeológicas e climáticas nas áreas de captação dos outros subsistemas. Sobre a bacia hidrográfica e hidrogeológica do vale glacial existe bibliografia recente, Daveau *et al.* (1997), Vieira (2004), Samper *et al.* (2005 e 2007), Afonso *et al.* (2006), Espinha Marques *et al.* (2009), Carreira *et al.* (2011), Espinha Marques *et al.* (2011), Caldas (2012), Espinha Marques *et al.* (2013) e Samper *et al.* (2015).

Respeitante ao período de 1986/87 a 1994/95, a avaliação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica correspondente ao vale glacial do rio Zêzere, a montante da estação hidrométrica de Manteigas (código INAG 11L/01H), foi feita por Espinha Marques *et al.* (2006, 2009, 2011 e 2013), Samper *et al.* (2005 e 2007) e Samper *et al.* (2015) utilizando o programa Visual Balan (Samper *et al.* 1999).

A bacia hidrográfica e a bacia hidrogeológica cujas áreas coincidem, no seu conjunto, funcionam como um filtro temporal e sequencial, que transforma o sinal de entrada (água da precipitação) num sinal de saída (caudal da linha de água).

Por via dos fenómenos que se passam na bacia, a água da precipitação separa-se em vários tipos de escoamento (Lencastre e Franco, 1984) que é possível identificar e quantificar a partir dos hidrogramas das estações hidrométricas.

Se no estudo da fenomenologia se perde muito pormenor, na obtenção dos resultados práticos que na maioria dos casos se procuram conhecer - os recursos hídricos disponíveis, superficiais e subterrâneos - obtém-se clareza e rapidez e exige-se menos esforço que nos modelos de balanço sequencial.

Na avaliação dos recursos hídricos disponíveis na região do concelho de Manteigas feita neste artigo utiliza-se um método de decomposição dos hidrogramas anuais da estação hidrométrica de Manteigas através do filtro digital de Eckhardt que está incorporado no programa de computador WHAT (Lim *et al.*, 2005).

O estudo inclui a análise de quarenta hidrogramas anuais da estação hidrométrica de Manteigas que pertencem a uma série descontínua que vai do ano hidrológico de 1949/50 a 2010/2011 (SNHIR, <http://snirh.pt/>).

O inventário de nascentes e galerias de mina que abastecem o concelho de Manteigas foi realizado em meados do mês de abril de 2016.

## 2. MÉTODOS DE ESTUDO

Num contexto de grande complexidade dos sistemas hidrológicos/hidrogeológicos e de escassez de dados experimentais, justifica-se a aplicação de modelos simples, do tipo caixa-negra, onde a precipitação e o caudal na linha de água representam, respetivamente, a entrada e saída do modelo. Estes modelos não requerem informação prévia sobre a estrutura e os parâmetros que regem o escoamento superficial e subterrâneo dos sistemas.

Entre os vários métodos para estimar os recursos hídricos subterrâneos renováveis (recarga da água subterrânea) inclui-se a análise de hidrogramas registados em estações hidrométricas (Oliveira, 2004). O hidrograma descreve a evolução do escoamento na linha de água ao longo do tempo; a sua configuração depende das características físicas da bacia hidrográfica e das condições climáticas.

A análise dos hidrogramas, na perspetiva deste estudo, consiste na separação do escoamento direto do escoamento de base. Este considera-se que representa a água que atinge a superfície freática, aumenta o armazenamento e o escoamento de água subterrânea e acaba por ser drenado e representar a contribuição das águas subterrâneas para o escoamento na rede hidrográfica.

Em ordem a evitar uma profusão de relações entre índices de escoamento e características das bacias hidrográficas, o relatório *Low Flow Studies* (Institute of Hydrology, 1980) recomendou o uso do *Base Flow*

*Index (BFI)* para indexar o efeito da geologia nos escoamentos (Gustard *et al.*, 1992). O *BFI* é a relação entre o escoamento de base e o escoamento total. Os métodos comuns de separação de componentes do hidrograma e do cálculo do *BFI* são ou gráficos que incidem na definição dos pontos onde a curva do escoamento de base intersecta as curvas de subida e de descida dos hidrogramas ou envolve filtros matemáticos onde a análise do hidrograma completo permite calcular o hidrograma do escoamento de base. Os últimos métodos, que não têm fundamento de natureza hidrológica, removem a subjetividade da separação manual e cumprem o objetivo de gerar uma resposta coerente, reproduzível e facilmente automatizável para a separação do escoamento de base (Nathan e McMahon, 1990).

Na primeira categoria incluem-se algoritmos que não são mais que aplicações de técnicas programáveis de separação e suavização do hidrograma do escoamento médio diário (Gustard *et al.*, 1992). O programa HYSEP (Sloto e Crouse, 1996), incluído nesta categoria, tem três métodos de separação do caudal de base: intervalo-fixo, intervalo-deslizante e mínimo-local.

Os métodos baseados em filtros digitais recursivos utilizam uma técnica usada originalmente na análise de processamento de sinais: separam os de alta dos de baixa frequência (Chapman, 1987; Nathan & McMahon, 1990; Arnold *et al.*, 1995; Eckhardt, 2005; e Lim *et al.*, 2005). Na filtragem, o escoamento de base corresponde às baixas frequências e o escoamento direto às altas frequências.

Nathan & McMahon (1990) propõem o filtro:

$$f_k = \alpha f_{k-1} + \frac{(1+\alpha)}{2}(y_k - y_{k-1}) \quad (1)$$

onde  $f_k$  é a resposta do escoamento direto filtrada no instante  $k$  do hidrograma,  $y_k$  é o valor original do hidrograma e  $\alpha$  é o parâmetro de filtragem. O valor recomendado do parâmetro de filtragem para análises efetuadas com valores diários é 0,925 e com três aplicações sucessivas do filtro (i.e. tempo crescente - tempo decrescente - tempo crescente). Este filtro é utilizado no programa BFLOW e, por isso, também é conhecido como “filtro BFLOW”. Neste estudo, a separação do escoamento de base é feita pelo programa WHAT (Lim *et al.*, 2005) que incorpora o filtro digital de Eckhardt (2005) cuja expressão é:

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max}) \alpha + b_{t-1} + (1 - \alpha) BFI_{max} Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (2)$$

onde  $b_t$  é o escoamento de base filtrado no tempo  $t$ ,  $b_{t-1}$  é o escoamento de base calculado no tempo  $t-1$ ,  $BFI_{max}$  é o valor máximo da razão entre o escoamento de base e o escoamento total,  $\alpha$  é o parâmetro de filtragem e  $Q_t$  é o escoamento total no tempo  $t$ .

$BFI_{max}$  é a variável introduzida neste filtro que permite considerar as condições hidrogeológicas locais. Eckhardt (2005) propõe o uso de valores  $BFI_{max}$  de 0,80 para linhas de água perenes em aquíferos porosos, de 0,50 para cursos de água intermitentes em aquíferos porosos e de 0,25 para escoamentos de linhas de água perenes em aquíferos fraturados (*hard rock aquifers*).

Em Brodie & Hostler (2005), o leitor encontrará outros filtros digitais recursivos usados na análise de hidrogramas.

### 3. A ÁREA DE ESTUDO

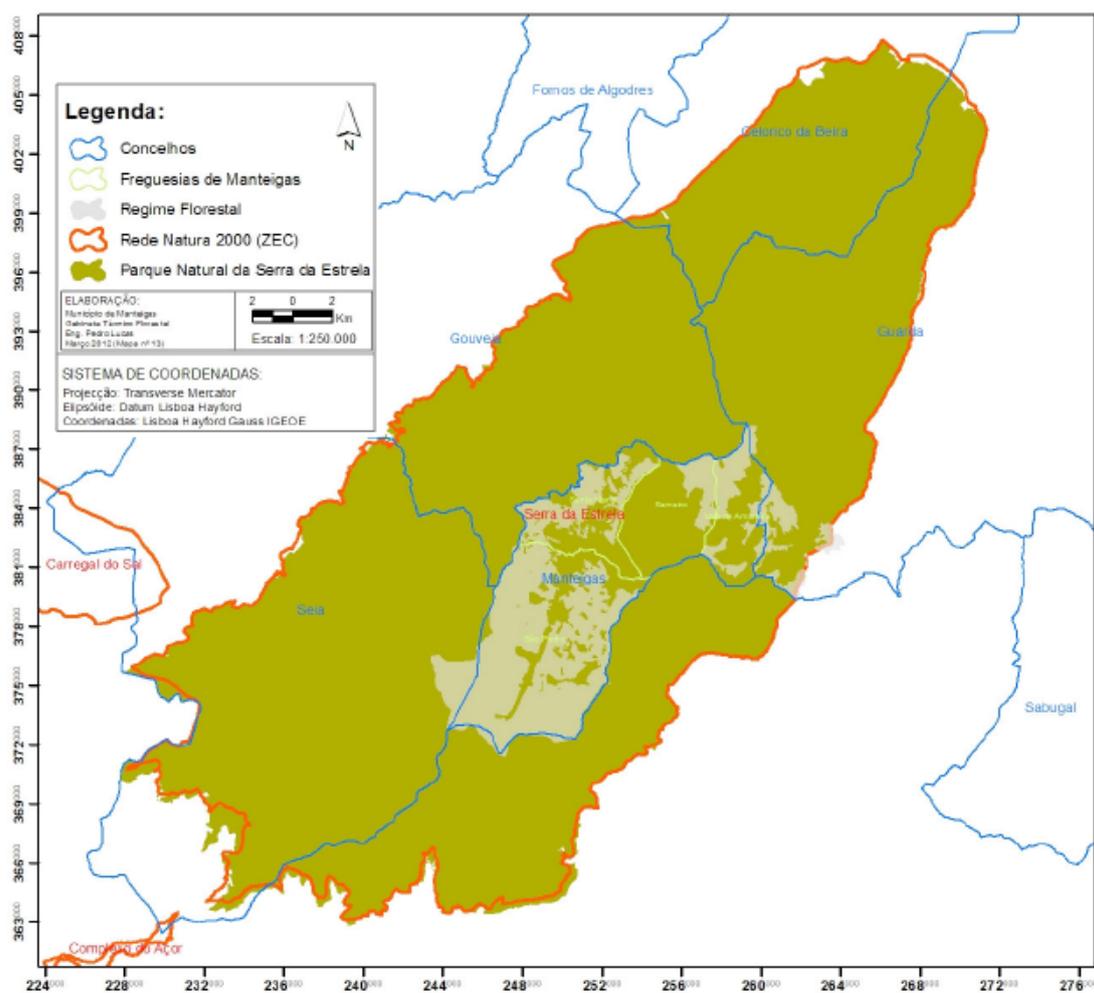
Toda a área do concelho de Manteigas se integra no Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE) e inclui a bacia hidrográfica do vale glacial do rio Zêzere em cujo leito se localiza a estação hidrométrica de Manteigas, única no troço do rio Zêzere que atravessa o concelho, Figura 1.

A cabeceira do rio Zêzere vai até ao Alto da Torre (1993 m) e individualiza-se na base do Cântaro Magro onde toma o rumo para NNE através de um percurso retilíneo por vale glacial profundo de perfil característico em U, até às proximidades da vila de Manteigas. Aqui inflete para nascente através de um percurso sinuoso com inflexões de direção importantes, de controlo litológico e tectónico. Passa por Sameiro, Vale de Amoreira e Valhelhas onde muda de direção para ESE.

No percurso retilíneo pelo vale glacial, as encostas muito íngremes são dominadas pelo planalto da Torre-Penhas Douradas (1450-1993 m) a ocidente e pelo planalto do Alto da Pedrice-Curral do Vento (1450-1761 m) a oriente.

Do ponto de vista morfotectónico, a Serra da Estrela situa-se na zona Centro-Ibérica. As principais unidades geológicas que ocorrem na região e em particular no concelho de Manteigas são (Figura 2):

- Granitos hercínicos de diferentes texturas, granularidades e composições mineralógicas: predomina o granito porfiróide de grão médio-grosseiro essencialmente biotítico ou biotítico-moscovítico.
- Rochas metassedimentares que no conjunto são incluídas no Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico (Grupo das Beiras do Supergrupo Dúrico-Beirão); nas zonas de contato com os



**Figura 1.** Parque Natural da Serra da Estrela (com delimitação dos concelhos interessados). Na área do concelho de Manteigas, a área em regime florestal é delimitada com sobrecarga (PMDFI).

granitos originam-se orlas de metamorfismo com formação de corneanas e xistos mosqueados.

- Depósitos aluvionares, glaciários quaternários, cones de dejeção e de pé de encosta ao longo do vale glacial do rio Zêzere. A largura e a espessura dos depósitos no fundo do vale aumentam de montante para jusante.

A tectónica é dominada por acidentes de orientação NNE-SSW que representam a megaestrutura regional designada por zona de falha de Bragança-Vilariça-Manteigas, a qual corresponde a um desligamento com movimento esquerdo e que constitui uma das mais importantes estruturas tardi-hercínicas de Portugal (Cabral, 1995).

As características geológicas, à semelhança das climáticas, das geomorfológicas e da ocupação do território, constituem uma componente física decisiva que controla a ocorrência, o movimento e as características físico-químicas da água, isto é, influencia as características e potencialidades dos sistemas hidrogeológicos, dos sistemas

hidrológicos superficiais, e dos sistemas de escoamento subterrâneo profundo que entram no domínio da geotermia.

A água das nascentes e galerias de captação dos subsistemas de Vale de Amoreira, de Sameiro e das captações do subsistema de Manteigas localizadas na encosta a NW da vila, emerge em encostas íngremes/muito íngremes, na parte superior de bacias hidrográficas de linhas de água de ordem 1, muitas vezes cerca de duas a três centenas de metros abaixo de superfícies de aplanamentos (Figura 3).

No vale glacial do rio Zêzere as nascentes localizam-se predominantemente na encosta oriental. A jusante do vale glacial, as nascentes e galerias localizam-se em encostas onde predominam as exposições a sul. Neste caso, resulta uma maior exposição à luz solar, aumento da evapotranspiração e a consequente diminuição da infiltração e recarga das unidades aquíferas.

Por oposição ao que foi dito sobre o efeito da evapotranspiração, a exposição das encostas

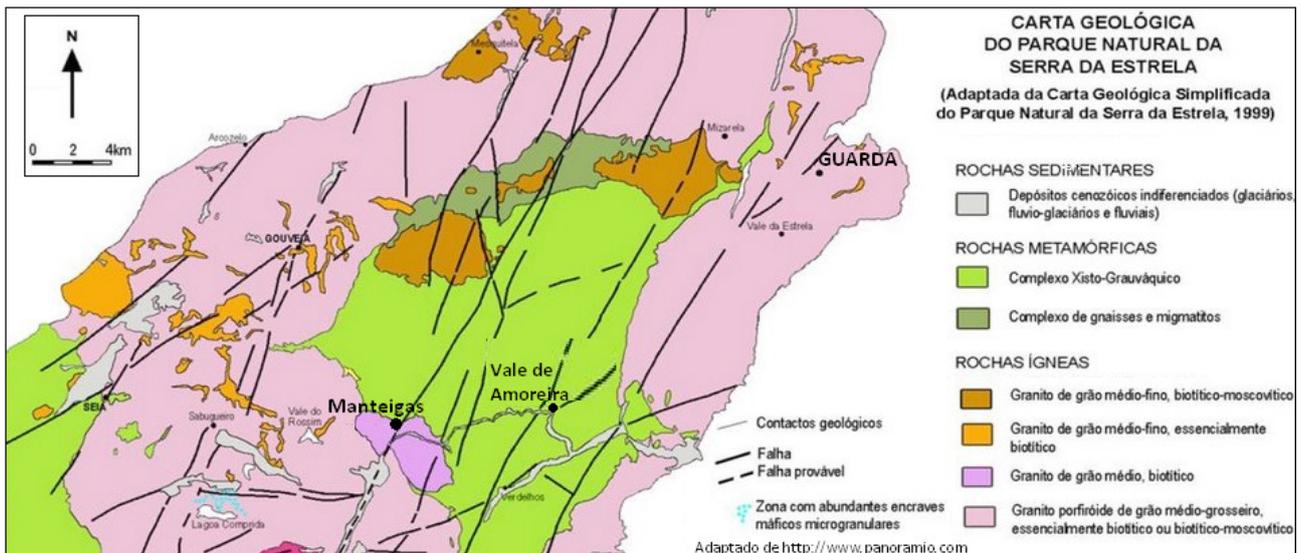


Figura 2. Extrato da adaptação da Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela de 1999.

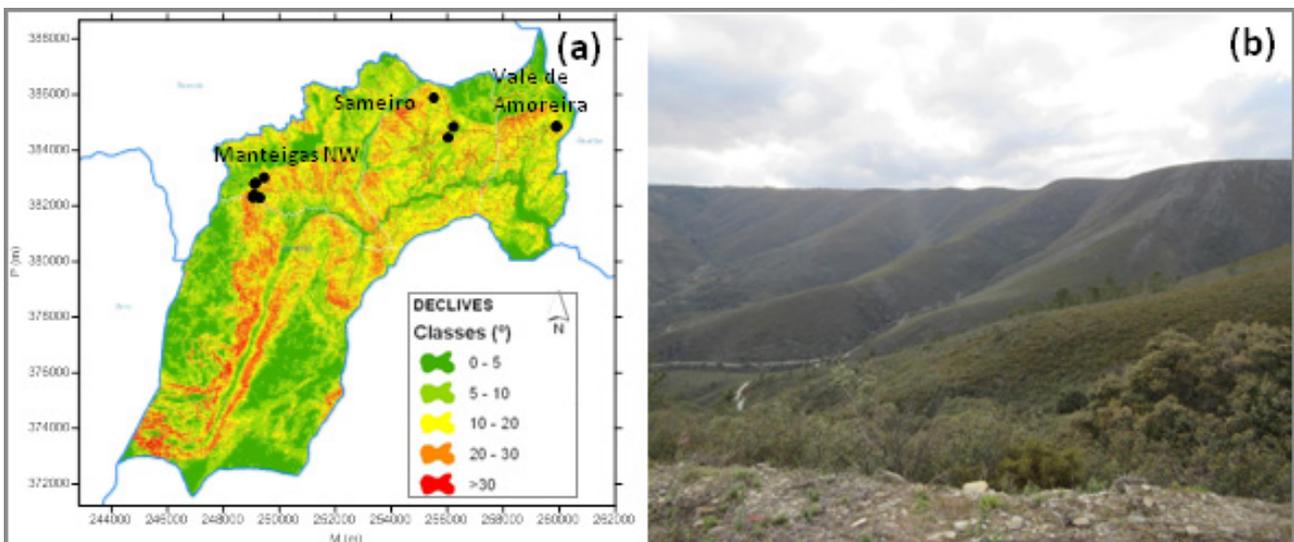


Figura 3. (a) Mapa de declives (PMDFI), com indicação da localização de nascentes e minas dos subsistemas de Vale de Amoreira, Sameiro e Manteigas (captações a NW de Manteigas) e (b) Vista para a vertente oriental do vale do ribeiro do Sameiro: arvoredo ao longo das linhas de água, predomínio do mato nos interflúvios e linha do horizonte definida pelo aplanamento com cerca de 1250 m de altitude.

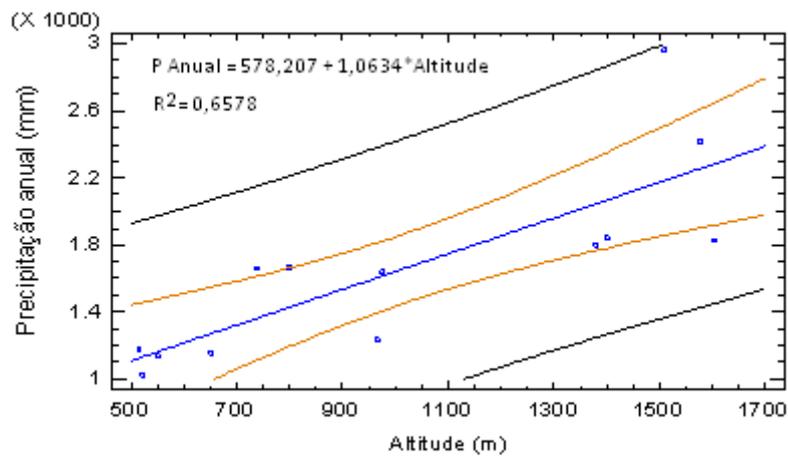
a sul, onde se localizam muitas das nascentes, é particularmente recetiva às chuvadas que acompanham os ventos do quadrante sul.

Tanto a temperatura como a precipitação variam com a altitude: a temperatura decresce e a precipitação aumenta (Figura 4 a Figura 6). No entanto, acima dos 1500 m de altitude, não é clara a importância da altitude na distribuição da precipitação: o valor médio anual mais elevado registado no período de 1951/80 foi de 2965 mm em Penhas da Saúde à altitude de 1510 m. A estação climatológica de Lagoa Comprida e o posto udométrico Covão do Ferro, localizados a 1604 m e 1577 m, registaram

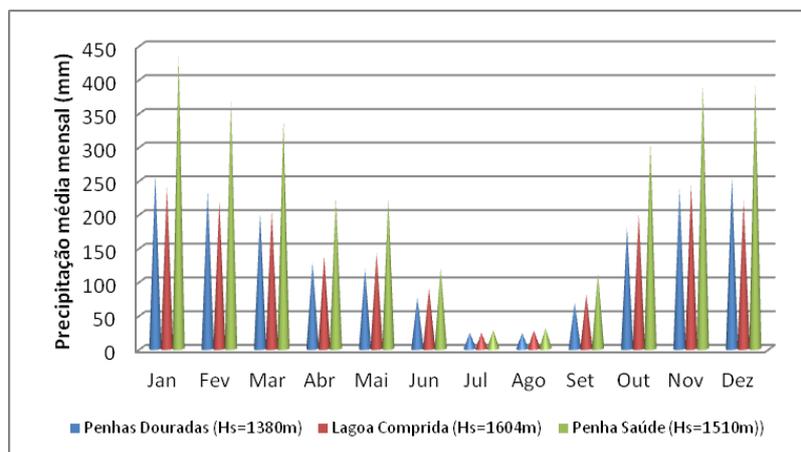
no mesmo período os valores médios anuais de 1826 mm e 2417 mm. As grandes quedas de neve aparecem, geralmente, de dezembro a março.

O clima, com influência mediterrânica e atlântica, apresenta verões quentes e secos e invernos frios e chuvosos/niveais. De acordo com a classificação climática de Köppen, é um clima do tipo CSb (clima moderado húmido com verão seco).

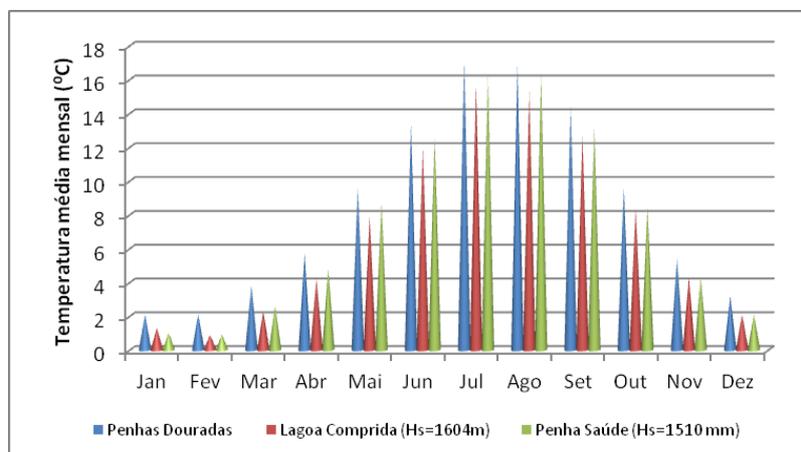
Determinaram-se os balanços hidrológicos sequenciais mensais médios ao nível do solo considerando os valores da precipitação das estações climatológicas de Penhas da Saúde e Penhas Douradas (1951/80). Considerou-se como



**Figura 4.** Regressão linear da precipitação anual sobre a altitude. A reta de regressão calculada pelo método dos mínimos quadrados tem cor azul; o limite do intervalo de confiança da reta de regressão é indicado pelas duas linhas de tom amarelado; as linhas de cor preta indicam o intervalo de predição para a variável dependente; os limites estão definidos para o nível de confiança de 95 %.



**Figura 5.** Precipitação média mensal nas estações climáticas de Penhas Douradas, Lagoa Comprida e Penhas da Saúde (período de 1951-1980), entre parêntesis é indicada a altitude das estações.



**Figura 6.** Temperatura média mensal nas estações climáticas de Penhas Douradas, Lagoa Comprida e Penhas da Saúde (período de 1951-1980), entre parêntesis é indicada a altitude das estações.

evapotranspiração potencial média mensal o valor que resulta do produto do número de dias de cada mês pelo valor médio diário (mm/d) da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (ET<sub>o</sub>). O valor máximo de água disponível para a utilização das plantas foi de 50 mm.

Do balanço sequencial de Penhas da Saúde (Figura 7) destacam-se os valores médios da precipitação de 2965 mm/ano, da evapotranspiração real de 724 mm/ano e dos excedentes de 2241 mm/ano. Do balanço com os valores médios da estação climatológica de Penhas Douradas (precipitação média anual igual a 1799 mm) calcularam-se os valores médios da evapotranspiração real de 655

mm/ano e dos excedentes de 1144 mm/ano.

A rede hidrográfica no território das freguesias de Vale de Amoreira, de Sameiro e da parte oriental da freguesia de Santa Maria desenvolve-se em formações do Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico com configuração dendrítica e com interflúvios arredondados. Mais a sul, na freguesia de São Pedro, que inclui o vale glaciário, onde afloram os granitos, a rede hidrográfica torna-se mais retilínea e quadrangular, seguindo alinhamentos tectónicos e fraturas nos granitos.

A bacia hidrográfica da EH de Manteigas tem a área aproximada de 27,51 km<sup>2</sup> (SNIRH); Caldas (2012) propõe 28,31 km<sup>2</sup> (Figura 8).

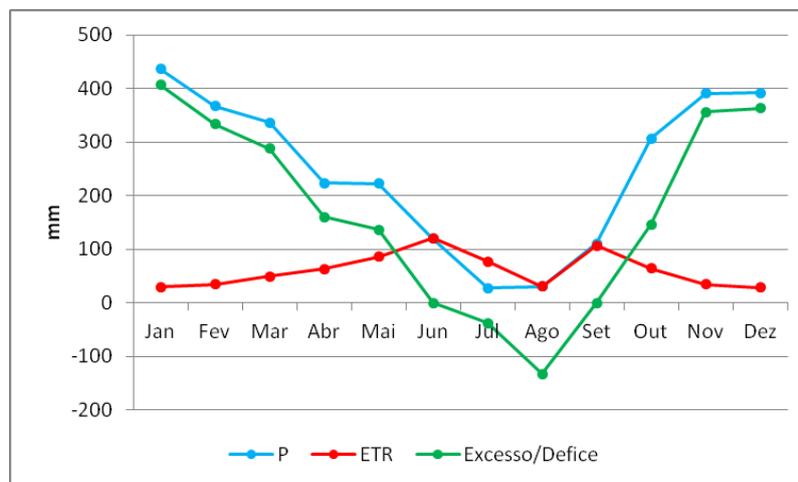


Figura 7. Balanço hidrológico sequencial mensal ao nível do solo (Penhas da Saúde).

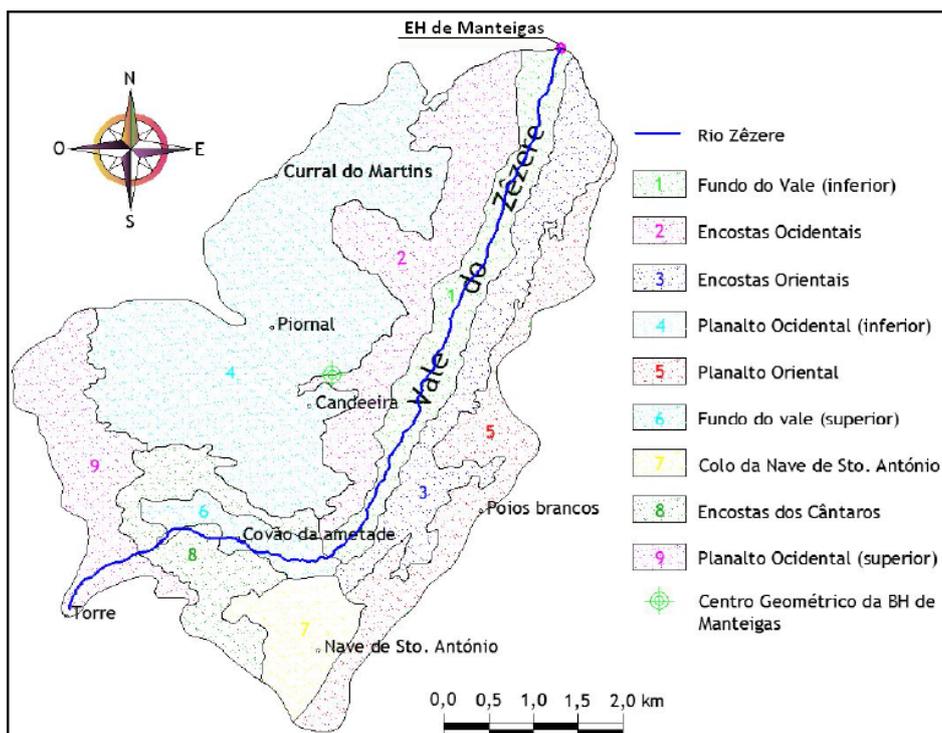


Figura 8. Delimitação da bacia hidrográfica e unidades hidrogeo-morfológicas (Caldas, 2012).

#### 4. AS CAPTAÇÕES DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO

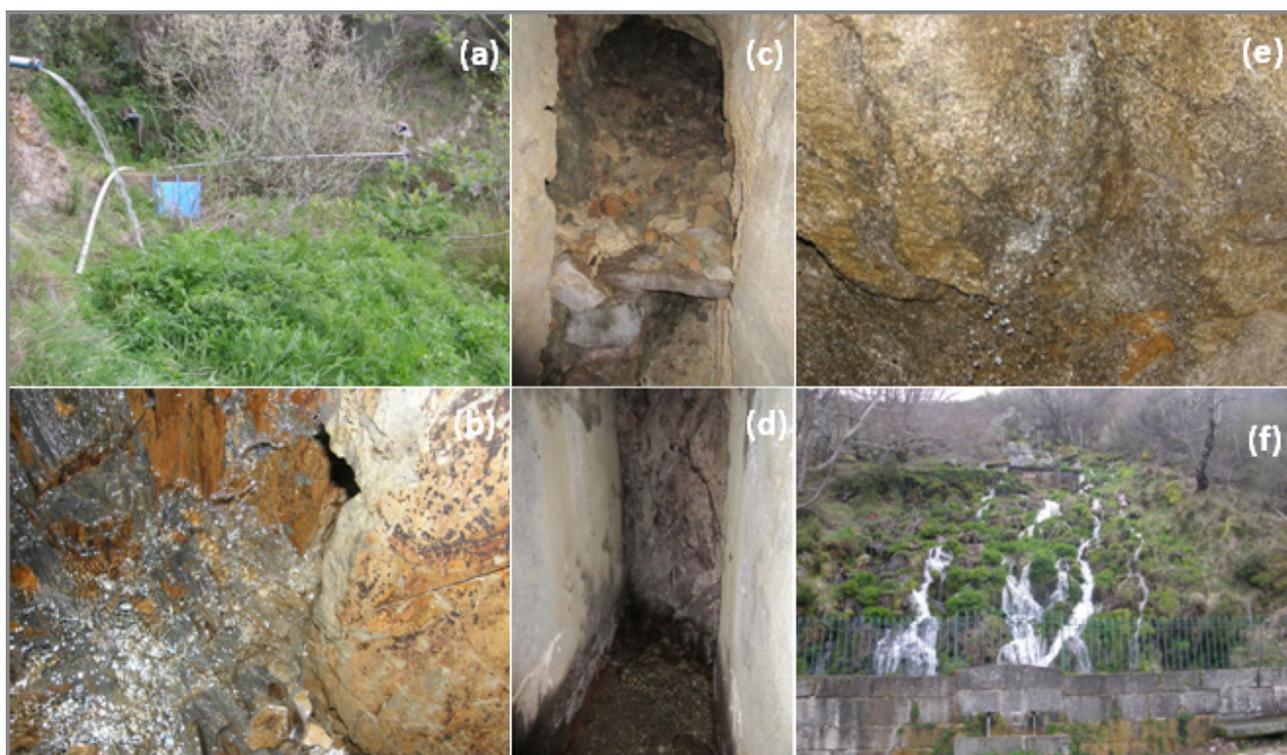
O sistema de abastecimento é constituído por três subsistemas autónomos: o de Vale de Amoreira, o de Sameiro e o de Manteigas (Figura 3).

- O subsistema de Vale de Amoreira inclui duas nascentes e três furos horizontais localizados nas encostas do vale da ribeira de Amoreira, Figura 9 (a).
- Do subsistema de Sameiro fazem parte três galerias nas encostas do vale da ribeira de Sameiro, Figura 9 (b), conhecidas como do Sameiro Velho.
- O subsistema de Manteigas inclui sete nascentes e minas localizadas na encosta que desce do planalto de Penhas Douradas para Manteigas, na parte superior das bacias hidrográficas da ribeira da Vila e da ribeira de Fronhas (captações a NW de Manteigas), Figura 9 (c), (d) e (e).

- O subsistema de Manteigas inclui captações localizadas na encosta oriental do vale glacial do rio Zêzere: as nascentes de Paulo Luís Martins (Figura 9 (f)) e do Mouco a montante da EH de Manteigas e, a jusante, nas proximidades das Caldas, as nascentes Fonte Santa 1, 2 e 3.

Em todos os subsistemas, o transporte da água é integralmente gravítico.

As captações dos subsistemas de Vale de Amoreira e de Sameiro localizam-se em formações do Complexo Xisto-grauváquico ante-Ordovícico. As captações a NW de Manteigas captam em metassedimentos da orla metamórfica de contato provocada pela intrusão dos granitos, em granitos de grão médio ou médio a fino, não porfiróides e uma em depósito quaternário. As localizadas na encosta oriental do vale glacial captam em granitos porfiróides de grão médio a grosseiro entre as quais a nascente de Paulo Luís Martins que é a mais produtiva do concelho e cujo caudal é repartido entre uma fábrica de engarrafamento de água e o abastecimento público de Manteigas.



**Figura 9.** Exemplos de captações do abastecimento de água do concelho de Manteigas: (a) Nascente ao centro da fotografia (porta de cor azul) e furos de captação horizontais do subsistema de Vale de Amoreira; (b) Emergência de água em formações do complexo xisto-grauváquico no final de uma mina com 13 m de comprimento, subsistema de Sameiro; (c) Captação em depósito quaternário no final de galeria com 12 m de comprimento, subsistema de Manteigas NW; (d) Emergência no contato com corneanas por uma espécie de único "bolhão" (5 L/s) localizado na base do final do hasteal esquerdo de galeria de 5,6 m de comprimento, subsistema de Manteigas NW; (e) Emergência em granito de grão médio, biotítico, no final de galeria com cerca de 70 m de comprimento, subsistema de Manteigas NW; (f) Nascente Paulo Luís Martins em granitos do vale glacial, a água em excesso da capacidade de transporte cai em cachoeira ao longo da encosta até ao nível da estrada, em cuja berma existe um chafariz de duas bicas, subsistema de Manteigas.

As formações metassedimentares e os granitos fora do vale glacial estão recobertos por depósitos de vertente contínuos, regra geral com espessura métrica, que permitem o enraizamento de vegetação rasteira (mato) especialmente nos interflúvios da bacia do ribeiro de Sameiro, de flora variada nas zonas húmidas dos talvegues (espécies ripícolas) e dos povoamentos florestais de pinhal bravo e mistos de folhosas e resinosas.

Os depósitos de vertente e a vegetação desempenham um papel importante na infiltração da água das precipitações por retardarem e dificultarem o escoamento superficial. Apesar deste fator favorável, o elevado declive e a reduzida capacidade de armazenamento das rochas xistosas, grauváquicas e graníticas, fazem com que a maioria das emergências forneça caudal de 0,5 L/s a 2 L/s no final da estação húmida. Como é comum nas emergências em rochas duras há importante variação sazonal do caudal que nalguns casos levam à improdutividade na estação quente e seca.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo inclui a análise de quarenta hidrogramas anuais da estação hidrométrica de Manteigas que pertencem a uma série descontínua que se inicia no ano hidrológico de 1949/50 e termina em 2010/2011 (Figura 10).

Esta série inclui quatro subséries: de 1949/50 a 1954/55 (5 anos, descontínua), de 1959/60 a 1970/71 (12 anos, contínua), 1978/79 a 1995/96 (18 anos, contínua) e 2004/05 a 2010/11 (5 anos, descontínua).

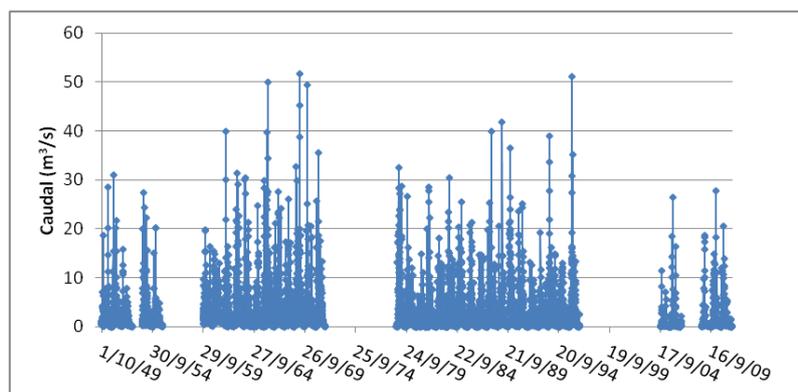
Considerando o escoamento na estação hidrométrica, do teste estatístico de Fisher (LSD - *least significant difference*) conclui-se que há diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos valores anuais do escoamento das quatro subséries para o nível de confiança de 95 %.

A subsérie de 2004/05 a 2010/11 é a que tem a média mais baixa (880 mm/ano); a subsérie de 1959/60 a 1970/71 é a de média mais elevada (2676 mm/ano); e a subsérie de 1949/50 a 1954/55 (média 1838 mm/ano) forma um grupo homogéneo quanto à média com a série de 1978/79 a 1995/96 (média 1932 mm/ano). Isto é, a série de valores de 40 anos que foi estudada inclui anos de condições climáticas variadas que se admite representarem o escoamento da bacia no longo prazo.

Além da separação das componentes dos hidrogramas da série de 40 anos, será considerada a análise dos hidrogramas do período 1986/87 a 1994/95 para comparação com resultados de estudos anteriores (Espinha Marques *et al.*, 2006 e 2013) e dos do período de 1951/80 a que pertencem os valores disponíveis da precipitação.

O modelo conceptual de fluxo do escoamento inclui as seguintes condições de fronteira: a bacia hidrográfica coincide com a bacia hidrogeológica e os limites laterais são de fluxo nulo, a cota piezométrica no rio é sempre inferior à do aquífero não havendo recarga do rio para o aquífero, não existem reservatórios de água superficial a montante da secção de referência. A recarga do sistema aquífero faz-se a partir das precipitações que caem na superfície, onde parte volta à atmosfera e a outra parte atravessa a zona não saturada e vai recarregar os sistemas aquíferos descontínuos subjacentes. Na parte superior destes, i.e. na zona da reserva renovável, a água é drenada pelo sistema aquífero voltando à superfície (constituindo o escoamento de base dos rios que pode ser assim utilizado como um indicador da recarga/recursos hídricos subterrâneos renováveis.

A separação do escoamento de base foi feita pelo programa WHAT (Lim *et al.*, 2005) através do filtro digital recursivo de Eckhardt (2005), com  $BFI_{max} = 0,25$ , Figura 11. Tomou-se a área da bacia igual a 27,51 km<sup>2</sup> (SNIRH).



**Figura 10.** Série descontínua de valores de caudal médio diário na EH de Manteigas de 1/10/1949 a 30/9/2011.

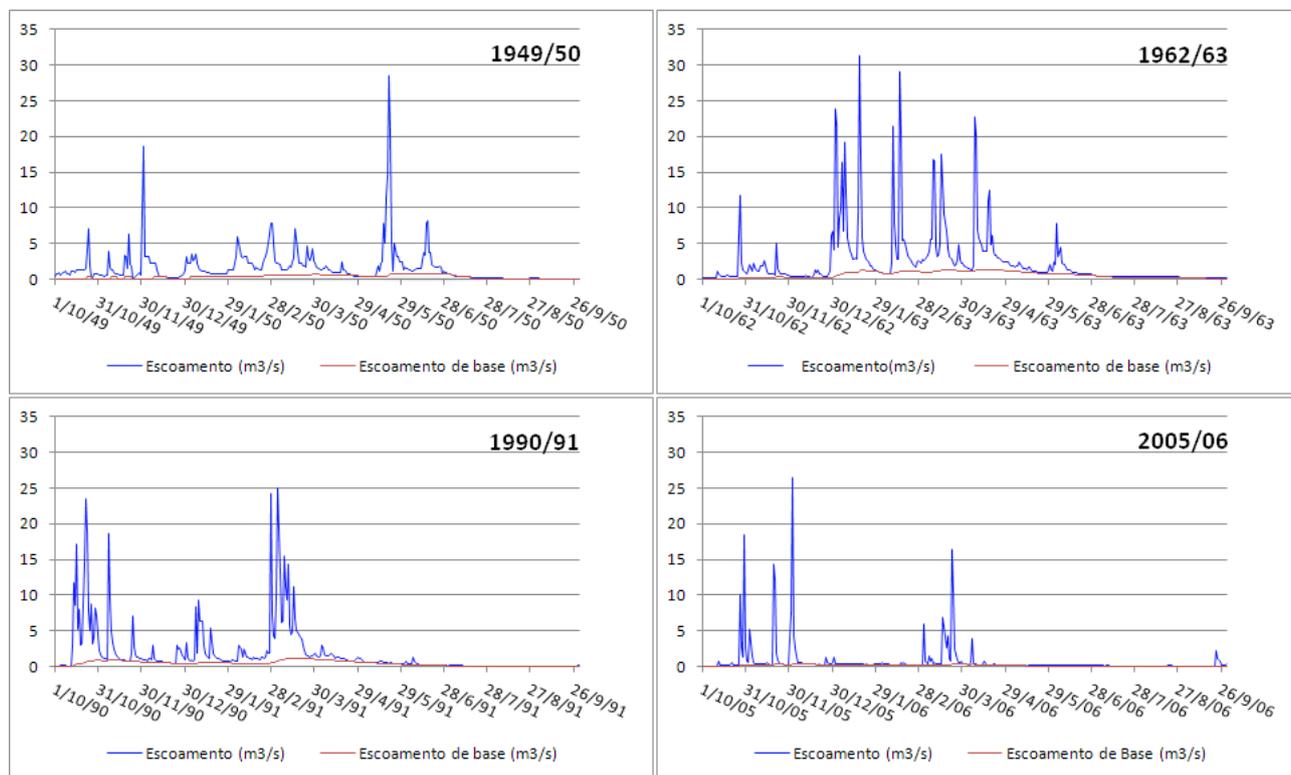


Figura 11. Exemplos de hidrogramas do escoamento e do escoamento de base com  $BFI_{max} = 0,25$ .

Quadro 1. Estatísticas principais dos resultados da decomposição dos hidrogramas anuais na estação hidrométrica de Manteigas com  $BFI_{max} = 0,25$  (série descontinua de 1949/50 a 2010/11).

Estatísticas	Escoamento (hm <sup>3</sup> /ano)	Escoamento (mm/ano)	BFI	Escoamento de base (hm <sup>3</sup> /ano)	Recarga subterrânea (mm/ano)
Nº valores	40	40	40	40	40
Média	52,94	2012	0,224	12,43	452
Mediana	57,41	2087	0,221	11,52	419
Desvio padrão	27,41	865	0,019	5,41	197
Coef. de variação	51,77%	42,99%	8,53%	43,55%	43,54%
Mínimo	2,89	414	0,191	2,89	106
Máximo	122,92	4468	0,277	26,63	968
Amplitude	120,03	4054	0,086	23,74	863
1º Quartil	39,22	1437	0,210	8,54	311
3º Quartil	69,96	2543	0,236	16,25	591

As estatísticas dos valores calculados da análise dos quarenta hidrogramas anuais disponíveis são apresentadas no Quadro 1. Em termos de recursos hídricos disponíveis, o escoamento total médio é de 52,94 hm<sup>3</sup>/ano (equivalente a 2012 mm/ano), o escoamento direto médio é de 40,51 hm<sup>3</sup>/ano (equivalente a 1560 mm/ano) e o escoamento de base médio (subterrâneo) é de 12,43 hm<sup>3</sup>/ano (equivalente a 452 mm/ano).

A precipitação média sobre a bacia estima-se em 2736 mm/ano que corresponde à soma da média do escoamento total na EH de Manteigas (2012 mm/ano) com a evapotranspiração real (724 mm/ano) calculada pelo balanço hídrico sequencial antes apresentado para a estação climatológica de Penhas da Saúde (Figura 7).

A percentagem da recarga relativamente à precipitação será cerca de 15,3 % e 16,5 %, conforme

se utilize a mediana ou a média da recarga. A bibliografia já citada refere valores semelhantes para a região do vale glacial do Zêzere.

O *BFI*, parâmetro característico da bacia hidrográfica, tem média de 0,224, tem um coeficiente de variação baixo (8,53 %), não se correlaciona com o caudal total na EH (o coeficiente de correlação é de 0,0315 e a reta de regressão da Figura 12 tem  $R^2 = 0,001$ ). Os quarenta valores do *BFI* ajustam-se à distribuição normal  $N(0,224; 0,019)$  para o nível de confiança de 95 % (teste de Shapiro-Wilk).

Por sua vez, os valores da recarga subterrânea anual expressos em mm/ano ajustam-se à distribuição normal  $N(451,88; 196,77)$  conforme o teste de Shapiro-Wilk para o nível de confiança de 95%.

A distribuição da recarga ao longo dos meses da série de 40 anos faz-se conforme a Figura 13: os dados apresentam uma ligeira assimetria positiva, todos os meses apresentam pontos *outside* (valores maiores que uma vez e meia a distância interquartis) e só os meses de outubro e de setembro incluem pontos *far outside* (valores maiores que três vezes a distância interquartis) que são usualmente indicativos de verdadeiros *outliers*. O mês de recarga média mais elevada é o de janeiro e o de recarga média mais baixa é o de setembro; no que respeita à mediana, o mês de valor mais elevado é o de março e o de menor valor é de setembro.

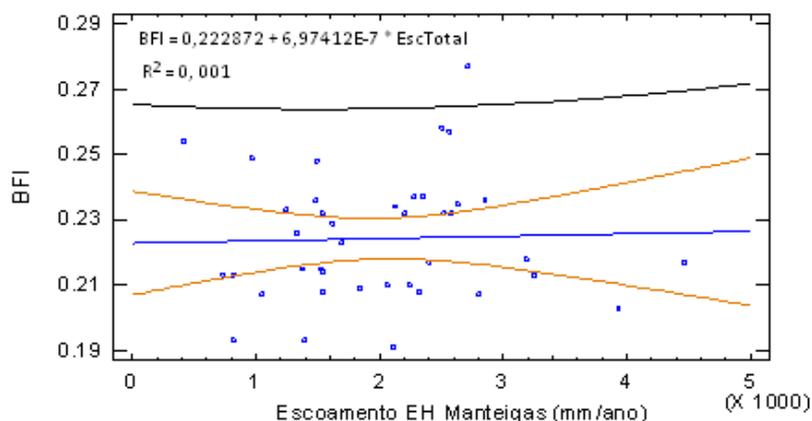
Os coeficientes de correlação de Pearson são altos conforme a matriz dos gráficos das correlações entre os valores da precipitação média mensal em Penhas da Saúde e o escoamento médio mensal na EH de Manteigas nos períodos de 1951 a 1980 (19 anos) e de 1949/50 a 2010/11 (40 anos) (Figura 14). Os coeficientes de correlação são estatisticamente

significativos para o nível de confiança de 95 %.

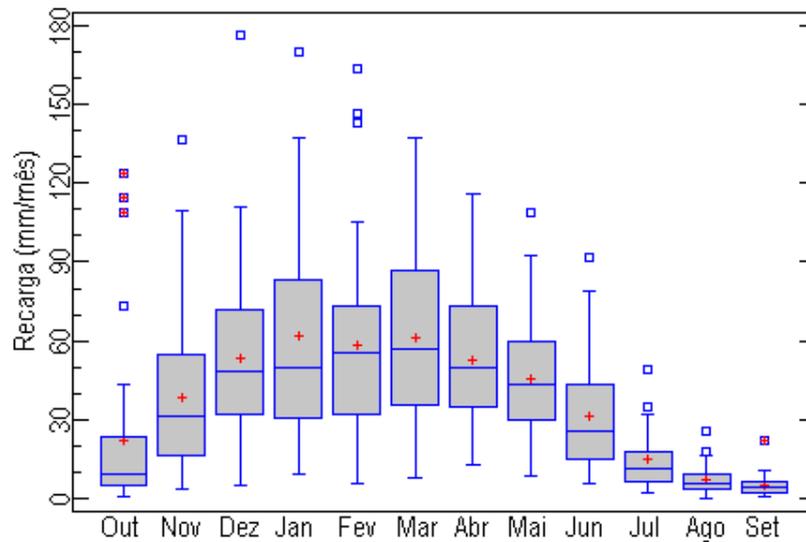
As retas de regressão do escoamento médio mensal na EH sobre a precipitação mensal em Penhas da Saúde (Figura 15) têm coeficientes de determinação elevados ( $R^2 = 0,863$  e  $R^2 = 0,936$ ), declives de 0,863 e 0,751 e termos independentes negativos que são superiores a -18 mm (escoamento médio mensal da série descontínua de 1951/1980 na Figura 15 (a) e da série descontínua de 40 anos na Figura 15 (b), respetivamente). Tanto num caso como no outro, a fração do escoamento mensal (Y) relativamente à precipitação mensal (X) segue o modelo de crescimento do tipo  $Y = a + b/X$ , onde a e b representam o declive e o termo independente da reta de regressão. Nos meses mais chuvosos do período de 1951/1980 o escoamento pode subir até cerca 84,0 % da precipitação e para o período da série descontínua de quarenta anos pode atingir cerca de 71 %.

O valor do escoamento médio anual de 2011,97 mm/ano, correspondente à série de 40 anos de medições do caudal no rio e o medido no período de 1986/87 a 1994/95 (1805,11 mm/ano), não são compatíveis com a precipitação média anual de 2336 mm/ano, conforme proposto por Espinha Marques *et al.* (2006 e 2013) para o período de 1986/87 a 1994/95. Com efeito, as diferenças de 324 mm/ano e 531 mm/ano são insuficientes para justificar a “evapotranspiração real ao nível das raízes e a interceção da precipitação” que é estimada por aqueles autores em 727 mm/ano.

Para o período de 1986/87 a 1994/95, entre os valores calculados evidenciam-se: a média do *BFI* = 0,229, a média do escoamento total 49,66 hm<sup>3</sup>/ano (1805,11 mm/ano), a média da recarga



**Figura 12.** Regressão linear do BFI sobre o escoamento total na EH de Manteigas. A reta de regressão calculada pelo método dos mínimos quadrados tem cor azul; o limite do intervalo de confiança da reta de regressão é indicado pelas duas linhas de tom amarelado; as linhas de cor preta indicam o intervalo de predição para a variável dependente; os limites estão definidos para o nível de confiança de 95 %.



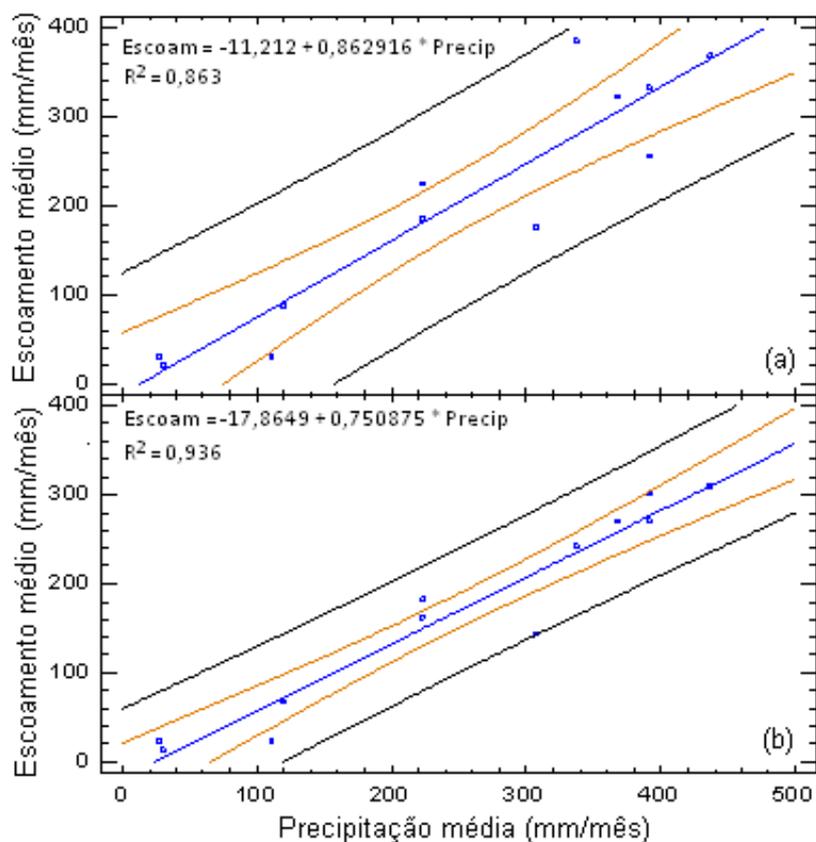
**Figura 13.** Estatísticas dos valores mensais da recarga de água subterrânea. Os limites inferior e superior da caixa com preenchimento a cor cinzenta representam o 1º e o 3º quartis, a linha horizontal que divide esta caixa significa a mediana, a cruz a cor vermelha indica a média, os extremos das linhas verticais que partem dos quartis (os bigodes) estendem-se até ao valor máximo e mínimo das observações de cada amostra, a não ser que os valores sejam suficientemente afastados da caixa para serem classificados de “outside” (quadrados sem preenchimento) e “far outside” (quadrados com cruz de cor vermelha).

<b>Precipitação média mensal (1951 - 1980)</b>		
	<b>Escoamento médio mensal (1951 - 1980, 19 anos)</b>	
		<b>Escoamento médio mensal (1949/50 - 2010/11, 40 anos)</b>

**Figura 14.** Matriz dos gráficos das correlações entre os valores das variáveis “Precipitação média mensal (1951-1980);” “Escoamento médio mensal (1951-1980, 19 anos)” e “Escoamento médio mensal (1949/50-2010/2011, 40 anos” . A precipitação diz respeito à estação climatológica das Penhas da Saúde e escoamento refere-se aos valores medidos na EH de Manteigas.

subterrânea = 11,25 hm<sup>3</sup>/ano (408,76 mm/ano), Quadro 2. A percentagem da recarga relativamente à precipitação é de 15 %. Embora os valores da subsérie de 1986/87 a 1994/95 sejam de facto inferiores aos da série de 40 anos não há diferença estatística significativa para o nível de confiança de 95 % (teste-t e teste LSD de Fisher).

No Quadro 2 também se comparam os valores acima descritos com os calculados pelo modelo Visual Balan para o mesmo período de 1986/87 a 1994/95. Da diferença das razões entre os valores em hm<sup>3</sup>/ano e mm/ano conclui-se que as áreas consideradas nos dois estudos são diferentes. A área da bacia hidrográfica efetivamente considerada por Espinha Marques



**Figura 15.** Regressões lineares do escoamento médio mensal sobre a precipitação média mensal em Penhas da Saúde (1951/1980) para o nível de confiança de 95%. (a) Escoamento médio mensal da série descontínua de 1951/1980 (19 anos) e (b) escoamento médio mensal da série descontínua de 40 anos. A reta de regressão calculada pelo método dos mínimos quadrados tem cor azul; o limite do intervalo de confiança da reta de regressão é indicado pelas duas linhas de tom amarelado; as linhas de cor preta indicam o intervalo de predição para a variável dependente; os limites estão definidos para o nível de confiança de 95 %.

*et al.* (2006 e 2013) foi de 31,05 km<sup>2</sup> (Quadro 3), valor que é 12,8% mais elevado que a área de 27,51 km<sup>2</sup> considerada no presente artigo. Espinha Marques *et al.* (2006 e 2013) havia enunciado que a "bacia do Zêzere a montante de Manteigas ... tem uma área de cerca de 28 km<sup>2</sup>" e Samper *et al.* (2007) refere 28,04 km<sup>2</sup>.

Uniformizando a área da bacia para 31,05 km<sup>2</sup>, os valores dos escoamentos e da recarga em mm do Quadro 1 e do período de 1986/1987 a 1994/95 passariam a ser 12,8 % mais baixos. Ter-se-ia o valor da recarga de 351,17 mm/ano para a série de 40 anos, equivalente a 15 % da precipitação de 2336 mm/ano considerada por Espinha Marques *et al.* (2006 e 2013). Para a precipitação de 2736 mm/ano, conforme proposto neste artigo, a recarga seria de 12,8 % da precipitação.

Concluindo, os caudais de recarga subterrânea/caudal de base calculados pelos programas Visual Balan e WHAT são praticamente iguais para a série de 1986/87 a 1994/95, se a área considerada nos

dois estudos for uniformizada. No entanto, em face dos dados reportados, considera-se que a série do período de 1986/1987 a 1994/95 tem duração insuficiente para se poder considerar representativa da bacia.

### Avaliação dos recursos subterrâneos a jusante do vale glaciar

Na avaliação dos recursos hídricos subterrâneos das bacias dos ribeiros de Vale de Amoreira, Sameiro e da encosta a NW da vila de Manteigas utilizou-se o valor do  $BFI = 0,224$  da bacia do vale glaciar. Embora todas as bacias interessassem rochas duras com comportamento hidrogeológico semelhante parece haver alguma diferença na continuidade e espessura nos depósitos das vertentes e no coberto vegetal, pelo que eventualmente aquele valor peca por defeito.

Os valores anuais da precipitação foram calculados

**Quadro 2.** Razão entre valores calculados pelo método de separação de componentes do hidrograma (presente artigo) e valores calculados pelo programa Visual Balan (Espinha Marques *et al.*, 2006), período de 1986/87 a 1994/95.

Componente do balanço hídrico	Espinha Marques et al., 2006 (1)		Este artigo (2)		Razão: (2)/(1)	
	Média anual (mm)	Média anual (hm <sup>3</sup> )	Média anual (mm)	Média anual (hm <sup>3</sup> )	(mm)	(hm <sup>3</sup> /ano)
Caudal subterrâneo	361,34	11,22	408,76	11,25	1,13	1,00
Caudal total rio Zêzere	1612,95**	50,08**	1805,11*	49,66*	1,12	0,99

\*valor medido, \*\*valor calculado pelo programa Visual Balan

**Quadro 3.** Alguns dos valores calculados pelo programa Visual Balan v2 (Espinha Marques *et al.*, 2006) e cálculo da área da bacia (período de 1986/87 a 1994/95).

Componente do balanço hídrico	Espinha Marques et al. (2006)				Cálculo da área da bacia hidrológica (km <sup>2</sup> )	
	Média anual (mm)	Média anual (hm <sup>3</sup> )	Total no período (mm)	Total no período (hm <sup>3</sup> )	Média anual	Total no período
Precipitação	2335,55	72,51	21020,19	652,62	31,05	31,05
Escoamento subsuperficial	947,11	29,41	8523,53	264,63	31,05	31,05
Caudal subterrâneo	361,34	11,22	3251,86	100,96	31,05	31,05
Caudal total rio Zêzere	1612,95	50,08	14516,68	450,71	31,05	31,05
Recarga dos aquíferos	361,65	11,23	3254,85	101,05	31,05	31,05

a partir da regressão linear sobre a altitude definida na Figura 4.

A evapotranspiração real foi determinada para cada bacia por balanço hídrico sequencial mensal, tomando a reserva de água utilizável pelas plantas de 100 mm e a evapotranspiração potencial mensal calculada, como foi atrás descrito, através da evapotranspiração de referência média diária de Penman-Monteith da estação climatológica de Penhas Douradas.

A altitude desta estação climatológica, embora mais elevada, é a que mais se aproxima da altitude média das bacias daqueles afluentes do rio Zêzere (Quadro 4).

A precipitação mensal para cada bacia foi calculada através de regressões lineares dos valores mensais da precipitação sobre a altitude do conjunto das treze estações udométricas localizadas na área da Serra da Estrela. O coeficiente de determinação médio das doze equações de regressão mensais é de  $R^2 = 0,592$ , com valor mínimo de  $R^2 = 0,453$  e máximo de  $R^2 = 0,715$ .

No Quadro 4 é apresentada uma primeira aproximação das características e da avaliação dos recursos hídricos renováveis de cada uma das bacias hidrográficas dos afluentes da margem esquerda do rio Zêzere, onde se localizam emergências de água que abastecem o concelho de Manteigas. A sequência dos dados do Quadro 4 ilustra também a metodologia de cálculo utilizada.

A avaliação do mérito da extrapolação também se faz através da comparação do caudal inventariado nas captações de Vale de Amoreira, de Sameiro e das localizadas a NW de Manteigas e o caudal calculado para a hipotética bacia drenante (definida por critério geomorfológico/topográfico) de cada uma das captações que, em regra, é um fração limitada da bacia hidrográfica onde se localiza. A metodologia de cálculo adotada é igual à utilizada para as bacias hidrográficas (Quadro 4)

No que respeita às captações de Vale de Amoreira, o caudal médio calculado através do BFI e modelos de regressão (0,5 L/s) é muito inferior ao caudal observado no mês de Abril de 2016 (3 L/s). Tendo

em conta a geomorfologia, conclui-se que a bacia definida por critério geomorfológico/topográfico não coincide com a bacia de chamada das captações. Esta, na interpretação adotada, ultrapassa a linha de cumeada da encosta onde se encontram as captações e inclui a parte mais elevada da vertente oposta do festo.

Na bacia hidrográfica do ribeiro de Sameiro, consideraram-se duas sub-bacias das captações: a que é drenada pela galeria do Vale (caudal não avaliado em Abril de 2016) e a que inclui as outras duas nascentes inventariadas (2,2 L/s). No primeiro caso, o valor afluente calculado foi de 1,5 L/s e no segundo caso calculou-se o caudal de 3,6 L/s. Tanto num caso como no outro, os valores calculados estão na gama de valores expectáveis para o caudal médio das nascentes.

Na encosta NW de Manteigas consideraram-se quatro sub-bacias de drenagem onde se localizam as sete nascentes e minas aí inventariadas. O valor calculado foi quase sempre inferior ao valor medido ou estimado. No caso de duas nascentes com os caudais de 0,75 L/s e 1 L/s localizadas em sub-bacias separadas, os valores calculados são 0,65 L/s e 0,59 L/s, respetivamente. A diferença é maior no caso duma captação muito produtiva (valor médio calculado de 1,2 L/s e caudal estimado de 5 L/s). Às restantes quatro minas atribuiu-se a mesma sub-bacia: o caudal total observado estimou-se em 3 L/s, e o caudal calculado foi de 1,1 L/s.

## CONCLUSÕES

Este estudo permitiu reconhecer e caracterizar uma parte muito significativa do sistema de captações do abastecimento público de água ao concelho de Manteigas. O sistema de abastecimento é constituído por três subsistemas autónomos: o de Vale de Amoreira, o de Sameiro e o de Manteigas. Em todos os subsistemas, o transporte da água é integralmente gravítico. As captações dos vários subsistemas estão localizadas na parte superior da bacia do rio Zêzere a montante da vila de Manteigas (vale glacial do Zêzere) e bacias de afluentes daquele rio localizadas a jusante do vale glacial.

A captação de água faz-se em nascentes e galerias de mina que drenam as rochas duras graníticas e metassedimentares ante-ordovícicas. O regime do caudal segue o ciclo das precipitações, com caudais habituais neste tipo de litologias (valores entre 0,5 e 2 L/s) e valores anormais (*outliers*) geralmente associados a localizações onde há condições geoestruturais e geomorfológicas particularmente favoráveis ao armazenamento, ao movimento e à emergência de água (casos da Nascente de Paulo Luís Martins na vertente oriental do vale glacial e da Nascente do Conde na encosta a NW da vila de Manteigas).

Os recursos hídricos renováveis foram avaliados na bacia a montante da EH de Manteigas (vale glacial) através da análise de hidrogramas desta EH pelo filtro digital de Eckhardt incluído no

**Quadro 4.** Características e recursos hídricos das bacias hidrográficas de afluentes da margem esquerda do rio Zêzere onde se localizam captações do abastecimento público fora do vale glacial.

Parâmetros	Bacias hidrográficas dos ribeiros		
	de Vale de Amoreira	de Sameiro	de Fronhas e da Vila
Área (km <sup>2</sup> )	5,11	9,33	6,19
Perímetro (km)	9,84	12,72	11,13
Altitude média (m)	849	945	1205
Precipitação (mm/ano)	1477	1583	1860
Precipitação (hm <sup>3</sup> /ano)	7,55	14,77	11,52
ETR (mm/ano)	650	659	685
Escoamento total (mm/ano)	827	924	1175
Escoamento total (hm <sup>3</sup> /ano)	4,22	8,62	7,28
BFI	0,224	0,224	0,224
Escoamento base (mm/ano)	185	207	263
Escoamento base (hm <sup>3</sup> /ano)	0,95	1,93	1,63
Escoamento de base (L/s)	30	61	52
Porcentagem da precipitação (%)	13	13	14

programa de computador WHAT. O filtro inclui a variável  $BFI_{max}$  que permite considerar as condições hidrogeológicas locais.

No período de 1986/87 a 1994/95, os valores calculados pelo programa WHAT são idênticos aos determinados anteriormente pelo programa de balanço sequencial Visual Balan.

Da análise de quarenta hidrogramas anuais da EH de Manteigas (série descontínua de 1949/50 a 2010/11) salienta-se o valor médio do  $BFI$  de 0,224, o valor da média do escoamento total de 52,94 hm<sup>3</sup>/ano (2011,97 mm/ano), o valor médio da recarga subterrânea 12,43 hm<sup>3</sup>/ano (451,88 mm/ano) e a média do escoamento direto de 40,51 hm<sup>3</sup>/ano.

Com a extrapolação dos valores calculados na bacia do vale glaciário para as bacias dos ribeiros de Vale de Amoreira, do Sameiro e da encosta a NW da vila de Manteigas (ribeiros de Fronhas e da Vila) calcularam-se os valores do escoamento subterrâneo de 30 L/s, 51 L/s e 52 L/s, respetivamente.

Concluiu-se também que no ambiente hidrogeológico das rochas duras, a localização e as condições morfoestruturais influenciam a configuração e a extensão da área de chamada e o caudal das emergências. A metodologia de análise utilizada à escala das bacias é coerente. À escala das emergências, não explica os caudais elevados em algumas nascentes, quando as influências estruturais se sobrepõem às influências hidrológicas superficiais proporcionadas pela envolvente geomorfológica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EPAL as facilidades concedidas no acesso às captações e à informação existente.

Aprezamos agradecer as sugestões feitas pelos membros do Conselho Redatorial que avaliaram o artigo para publicação.

## BIBLIOGRAFIA

Afonso, M.,J., Espinha Marques, J., Marques, J.M., Carreira; P.M., Fonseca, P.E., Gomes, A., Carvalho, J.M., Samper, J., Borges, F.S., Rocha, F.T. & Chaminé, H.I. (2006). *Caracterização multidisciplinar dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e montanhosas (Norte e Centro de Portugal: metodologias e técnicas*. Actas do II fórum ibérico de águas engarrafadas e termalismo, Porto.

Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R. & Bernhardt, G. (1995). Automated baseflow separation and recession analysis techniques. *Groundwater* 33 (6), 1010-1018.

Brodie, R.S. & Hostetler S A. (2005). *A review of techniques for analyzing baseflow from stream hydrographs*. In Proceedings International Water Conference, NZHS-IAH, Auckland, Nov28-Dec3.

Cabral, J. (1995). *Neotectónica em Portugal continental*. Mem. do Inst. Geol. Min. Portugal, 31, pp265.

Caldas, A.J.C. (2012). *Efeito do aumento da área urbanizada nos caudais e nas alturas de escoamento em cheia numa pequena bacia hidrográfica: aplicação à bacia hidrográfica de Manteigas no rio Zêzere*. Universidade da Beira Interior, Faculdade de Engenharia, tese de mestrado não publicada, pp 124.

Carreira, P.M., Marques, J.M., Espinha Marques, J., Chaminé, H.I., Fonseca, P.E., Monteiro Santos, F., Moura, R.M., & Carvalho, J.M. (2011). Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, 19, 117-131.

Chapman, T.G. (1987). Unit hydrograph identification using only streamflow data. *Transactions of the Institution of Engineering*, Australia CE29 (3), 187-191.

Daveau, S., Ferreira, A.B., Ferreira, N. (1997). Novas observações acerca da glaciação da Serra da Estrela. *Estudos Quaternários*, 1, APEQ, Lisboa, 41-47.

Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19 (2), 507-515.

Espinha Marques J., Samper J., Pisani B.V., Alvares, D., Vieira, G.T., Mora, C., Carvalho, J.M., Chaminé H.I., Marques J.M. & Borges F.S. (2006). Avaliação de recursos hídricos através de modelação hidrológica: aplicação do programa Visual Balan v2.0 a uma bacia hidrográfica na Serra da Estrela (Centro de Portugal). *Cadernos Lab.. Xeolóxico de Laxe Coruña*, vol.31, 43-65.

Espinha Marques J., Samper J., Pisani B., Alvares, D., Carvalho, J.M., Chaminé H.I., Marques J.M. & Borges F.S. (2009). *Assessment of water resources in a mountain environment applying a semidistributed hydrological model: Serra da Estrela case, Central Portugal*. In: O. Silva e J. Carrera (eds.), IX Jornadas de Estudios en la Zona no Saturada, ZNS'09, vol IX, 514-521.

Espinha Marques J., Samper J., Pisani B., Alvares, D., Carvalho, J.M., Chaminé H.I., Marques J.M., Vieira, G.T., Mora, C. & Borges F.S. (2011). Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, central Portugal, using a semi-distributed

- hydrogeological model. *Environ Earth Sci*, 62, 1219-1234.
- Espinha Marques, J., Marques, J.M., Chaminé, H.I., Carreira, P.M., Fonseca, P.E., Monteiro Santos, F., Moura, R., Samper, J., Pisani, B., Teixeira, J., Carvalho, J.M., Rocha, F.T., & Borges, F.S. (2013). Conceptualizing a mountain hydrogeologic system by using an integrated groundwater assessment (Serra da Estrela, central Portugal): a review. *Geosciences Journal* Vol 17, N 3, 371-386.
- Gustard, A., Bullock, A. & Dixon, J.M. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*. Institute of Hydrology, report nº 108; Natural Environmental Research Council, pp 88.
- Institute of Hydrology (1980). *Low Flow Studies report*, Wallingford, UK.
- Lencastre A. E Franco, F.M. (1984). *Lições de hidrologia*. Lisboa, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, pp 451.
- Lim, K.J., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K.S., Muthukrishnann, S. & Tripathy, D., (2005). Automated WEB GIS based hydrograph analysis tool, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*, December 2005, 1407-1416.
- Nathan R.J. & McMahon T.A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water Resources Research*, 26 (7), 1465-1473,
- Oliveira, M.J.P.M. (2004). *Recarga de águas subterrâneas: métodos de avaliação*. Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, tese de doutoramento não publicada, pp 440.
- PMDFI, Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios: Manteigas 2013-2017*, (CMDFCI-Manteigas).
- Samper, J., Huguet, L.L., Arés, J. & García Vera, M.A. (1999) *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. Technical Publication ENRESA, Madrid, 5/99, pp 205.
- Samper, J., García Vera, M.A, Pisani B., Alvares, D., Espinha Marques J., Varela, A. & Losada J.A. (2005). *Hydrologic models and geographic information systems for water resources evaluation: Application of GIS-BALAN to Atlantic basins in Spain and Portugal*. The fourth inter-Celtic colloquium on hidrology and management of water resources, Guimarães, Portugal, July, 11-14.
- Samper, J., García Vera, M.A, Pisani B., Alvares, D., Espinha Marques J., Varela, A. & Losada J.A. (2007). *Using hydrological models and Geographic Information Systems for water resources evaluation: GIS-VISUAL-BALAN and its application to Atlantic basins in Spain (Valiñas) and Portugal (Serra da Estrela)* in Water in Celtic countries: quantity, quality and climate variability, proceedings of the fourth inter-Celtic colloquium on hydrology and management of water resources, Guimarães, Portugal, July 2005. IAHS Publ. 310, 2007.
- Samper, J., Pisani, B., & Espinha Marques, J. (2015). Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins, *Environmental Earth Sciences*, Vol 73, N 6, 2645-2656.
- Sloto, R.A. & Crouse, M.Y. (1996). *HYSEP: a computer program for stream flow hydrograph separation and analysis*. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report, Reston, Virginia, 96-4040, 46 pp.
- Vieira, G.B.G.T. (2004). *Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela: ambientes frios do pliocénico superior e dinâmica actual*. Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras, Departamento de Geografia, tese de doutoramento não publicada, pp 724.