

# CONTRIBUIÇÃO PARA A QUANTIFICAÇÃO DAS RELAÇÕES RIO-AQUÍFERO NO SISTEMA AQUÍFERO QUERENÇA-SILVES

**Núria SALVADOR**

*Mestre em Gestão de Solos, Técnica de Hidrogeologia no ICCE, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, +351 289 800 100/900, nmsalvador@ualg.pt*

**Manuel M. OLIVEIRA**

*Doutor em Hidrogeologia, Investigador Auxiliar do Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 34 36, moliveira@lnec.pt*

**Edite REIS**

*Mestre em Geologia Económica e Aplicada, Técnica Superior da ARH Algarve, Rua do Alportel, 10, 8000 – 293 Faro, +351 28 988 90 00, ereis@arhalgarve.pt*

**Luís OLIVEIRA**

*Engenheiro do ambiente, bolseiro de projecto no Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC/DHA, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 37 86, loliveira@lnec.pt*

**João Paulo LOBO FERREIRA**

*Doutor em Engenharia Civil, Investigador-Coordenador e Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 36 09, lferreira@lnec.pt*

**José Paulo MONTEIRO**

*Doutor em Hidrogeologia, Professor e Investigador na Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, +351 289 800 100/900, jpmonte@ualg.pt*

## Resumo

A caracterização do balanço hidrológico dos sistemas aquíferos mesocenozóicos da região hidrográfica do Algarve tem sido tradicionalmente abordada de forma relativamente independente do estudo das águas superficiais. Considerando apenas estimativas de recarga autóctone, ou seja, considerando apenas a infiltração directa ocorrida na área das litologias que suportam estes aquíferos, e desprezando as relações de interdependência entre águas subterrâneas e superficiais. Actualmente, numa abordagem de gestão integrada dos recursos hídricos torna-se necessário aprofundar os conhecimentos acerca destas relações de forma a permitir uma quantificação adequada para a gestão da água nesta região.

Ainda que já existam referências acerca dos locais onde ocorrem interações entre águas subterrâneas e águas superficiais estas ainda não se encontram quantificadas, dada a sua complexidade e o elevado volume de informação necessária à sua caracterização.

A rede de monitorização instalada estrategicamente nos cursos de água para quantificar as entradas e saídas de água dos sistemas aquíferos do Algarve é relativamente recente, e ainda não se encontra totalmente optimizada. Apesar disso, recorrendo ao modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD e ao programa de decomposição de hidrogramas Dechidr\_VB, foi possível estimar através de um balanço hídrico, para o sistema aquífero Querença-Silves (QS), que cerca de 56 hm<sup>3</sup>, 77 % do escoamento superficial gerado dentro e fora do aquífero, se infiltra em troços e pontos influentes contribuindo para a recarga do sistema aquífero. Correspondendo este volume a cerca de 60% da recarga actualmente estimada para este sistema aquífero (RA), que apenas considera as entradas directas ocorridas na área do sistema aquífero.

Palavras-chave: Relações rio-aquífero, recarga subterrânea, aquífero cársico Querença-Silves, BALSEQ\_MOD, Dechidr\_VB

## 1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os recursos hídricos subterrâneos têm sido abordados, tanto numa perspectiva de gestão como numa perspectiva de investigação, de forma relativamente independente dos recursos superficiais (WINTER *et al.*, 1998). Compreender as interações entre águas subterrâneas e superficiais, e considerar estes sistemas como um único recurso, tem-se tornado uma necessidade cada vez mais evidente (WINTER *et al.*, 1998; SOPHOCLEOUS, 2002). Actualmente, as directrizes presentes na directiva 200/60/CE (UE, 2000), normalmente referida como “Directiva Quadro da Água” ou DQA, exigem que na gestão dos recursos hídricos para consumo humano e ecossistemas dependentes destes, se considerem e compreendam as interações entre sistemas subterrâneos e superficiais.

As interações que ocorrem entre águas subterrâneas e águas superficiais são bastante complexas, particularmente em sistemas cársicos onde ocorrem através de fracturas e cavidades cársicas (WINTER *et al.*, 1995; SOPHOCLEOUS, 2002). Os cursos de água podem ser definidos de acordo com o tipo de interação hidrodinâmica que estabelecem com as águas subterrâneas, rios efluentes recebem contribuições subterrâneas e rios influentes contribuem para a recarga dos aquíferos, neste último caso podendo ou não existir conexão hidráulica (WINTER *et al.*, 1998; SOPHOCLEOUS, 2002). Acontece muitas vezes que os troços dos rios alternam entre efluente e influente em diferentes períodos do ano hidrológico, de acordo com as condições hidrológicas. BAILLY-COMTE *et al.* (2009) apresentam um modelo conceptual de funcionamento das interações hidrodinâmicas que ocorrem entre águas superficiais e águas subterrâneas num aquífero cársico, aplicado no sul de França.

A identificação dos locais onde ocorrem estas interações rio-aquífero e a caracterização do seu funcionamento torna-se um conhecimento muito importante em possíveis cenários de contaminação de águas subterrâneas pelas águas superficiais, particularmente em sistemas cársicos onde as águas superficiais são rapidamente absorvidas através de condutas cársicas, ocorrendo pouca ou nenhuma atenuação da contaminação no solo (LERCH, 2005; SOPHOCLEOUS, 2002). Por outro lado, a caracterização destas interações poderá vir a melhorar de forma significativa a avaliação de disponibilidades e os riscos de exploração dos sistemas aquíferos. A caracterização da recarga nestes sistemas torna-se pois uma ferramenta essencial para a compreensão, modelação e protecção dos sistemas subterrâneos.

Em sistemas cársicos a recarga pode ocorrer sob a forma de recarga autóctone, originada como precipitação que se infiltra na área do sistema aquífero, podendo esta ser difusa ou concentrada em cavidades e condutas cársicas, ou ocorrer sob a forma de recarga alóctone, originada como escoamento superficial em solos de baixa permeabilidade nas sub-bacias hidrográficas localizadas fora da área do sistema aquífero que se infiltra em sumidouros e troços influentes ao longo dos cursos de água que o atravessam (GUNN, 1983; WHITE, 1988; PALMER, 2000; LERCH, 2005; TAYLOR e GREENE, 2008; BAILLY-COMTE *et al.*, 2008, 2009).

A caracterização do balanço hidrológico dos sistemas aquíferos mesocenozóicos da região hidrográfica do Algarve tem sido abordada de forma relativamente independente do estudo das águas superficiais. Considerando apenas estimativas de recarga autóctone, ou seja, considerando apenas a infiltração directa ocorrida na área das litologias que suportam estes aquíferos, e desprezando as relações de interdependência entre águas subterrâneas e superficiais. No Algarve as primeiras referências a locais onde ocorrem interações entre águas subterrâneas e águas superficiais foram feitas por ALMEIDA (1985) e SILVA (1988). Mais recentemente, a autoridade de gestão regional, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve (CCDR do Algarve), instalou uma rede de monitorização específica, actualmente sob a tutela da Administração da Região Hidrográfica

do Algarve (ARH Algarve), com o objectivo de quantificar as entradas e saídas de água, nos sistemas aquíferos do Algarve, a partir das linhas de água (REIS, 2007).

O presente estudo apresenta, para o sistema aquífero Querença-Silves (QS), estimativas dos volumes envolvidos nestas interacções rio-aquífero, descritas como um balanço hídrico entre os volumes de escoamento gerados dentro e fora do sistema aquífero nas sub-bacias dos cursos de água que o atravessam, e os volumes de escoamento que saem do sistema. Recorrendo aos dados da referida rede de monitorização dos cursos de água que atravessam o sistema QS, ao modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD e ao programa de decomposição de hidrogramas Dechidr\_VB.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

O sistema aquífero Querença-Silves (QS), localizado no Algarve central (ver Figura 1), é composto por formações aquíferas carbonatadas do Jurássico, apresentando-se livre a confinado (ALMEIDA *et al.*, 2000). Estendendo-se de sentido Este-Oeste, entre o rio Arade e Querença, cobre uma área irregular de 324 km<sup>2</sup> (MONTEIRO *et al.*, 2006). O sistema cársico é dividido em sub-unidades com comportamento hidráulico próprio (ALMEIDA *et al.*, 2000). O ponto de descarga mais importante do sistema são as nascentes de Estômbar, no limite oeste do sistema, onde se encontram vários ecossistemas dependentes das contribuições subterrâneas. O sistema encontra-se limitado a sul pela falha do Algre e a norte pelas rochas do Hetangiano - Triásico Superior (TERRINHA, 1998).

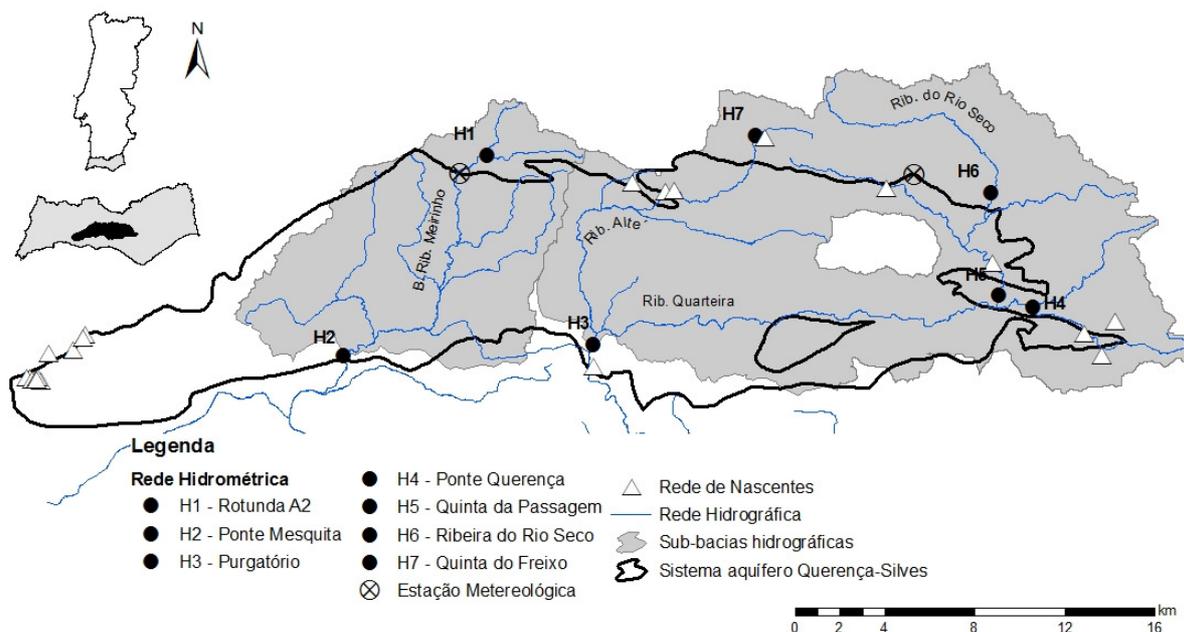


Figura 1 Área de estudo

O estudo da recarga do QS é particularmente importante para uma gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, uma vez que este é o maior e mais produtivo sistema aquífero do Algarve (STIGTER *et al.*, 2009), com grande relevo regional quer para abastecimento público quer para rega, tendo demonstrado um papel fundamental na seca 2004-2005 (MONTEIRO, 2006). As últimas estimativas de valores de recarga anual para o QS foram apresentados por MONTEIRO *et al.* (2006, 2007b, *inpress*) que referem um escoamento anual médio de 93 hm<sup>3</sup>, estimado a partir da distribuição da precipitação detalhada de NICOLAU (2002). Enquanto OLIVEIRA *et al.* (2008) referem um valor de recarga anual média de 100 hm<sup>3</sup>, para o período de 1941 até 1991, e OLIVEIRA *et al.* (2011) referem um valor de 94 hm<sup>3</sup>/ano, para o período de 1979 até 2009, ambos

estimados utilizando o modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD. Este último valor é muito próximo ao apresentado por MONTEIRO *et al.* (2006, 2007b, *inpress*).

Os cursos de água que cruzam o QS iniciam o seu percurso nas rochas paleozóicas de baixa permeabilidade da Serra, onde os valores de densidade de drenagem são elevados, geralmente superiores a 3,5 km/km<sup>2</sup> (ALMEIDA, 1985). Cruzando o sistema aquífero nas rochas mesozóicas que o suportam, onde uma elevada percentagem de água se infiltra devido à existência de rochas carbonatadas carsificadas de elevada permeabilidade, apresentando valores de densidade de drenagem entre 0-2 km/km<sup>2</sup> (ALMEIDA, 1985). As diferenças entre as condições hidrogeológicas da região da Serra e da região do Barrocal, apontam para a existência de uma forte contribuição de recarga alóctone, originada a partir do escoamento superficial gerado nas rochas paleozóicas que se infiltra na área do sistema aquífero contribuindo para o seu balanço hídrico. Nesta área, estes cursos de água, em diferentes períodos do ano hidrológico, alternam sucessivamente em pontos e troços efluentes, que recebem água subterrânea, e influentes, que contribuem para a recarga do aquífero.

A rede hidrográfica que atravessa o QS divide-se em duas bacias hidrográficas, a bacia do Barranco do Ribeiro Meirinho a oeste e a bacia da Ribeira de Quarteira a este. A Ribeira de Quarteira, muda de denominação diversas vezes ao longo do seu percurso, resulta inicialmente da confluência da Ribeira dos Moinhos com a Ribeira do Rio Seco, passando a ser designada de Ribeira de Menalva, depois Ribeira do Algibre e, finalmente, a jusante da confluência com a Ribeira de Alte, passa a ser denominada de Ribeira de Quarteira. Esta ribeira apresenta no seu curso superior à entrada do aquífero troços influentes e efluentes, sendo no seu curso inferior, como Ribeira do Algibre, que estas interações se intensificam (ALMEIDA *et al.*, 2000, REIS, 2007). Verifica-se que, junto aos limites norte do sistema aquífero, existem algumas exurgências de água subterrânea que alimentam estas ribeiras. A ribeira de Alte é alimentada pelas nascentes de Alte, e a ribeira do Algibre pelas nascentes de Salir, Benémola, Fonte Filipe e Almarjão. Na Figura 1 encontra-se representada a rede hidrográfica que atravessa o sistema QS, e a localização das nascentes anteriormente referidas.

MONTEIRO *et al.* (2007a, *inpress*) apresentam alguns resultados de simulações do modelo numérico de elementos finitos desenvolvido regionalmente para o QS (HUGMAN *et al.*, *inpress*, MONTEIRO *et al.*, 2006) usado para investigar factores que controlam a distribuição espacial das interações rio-aquífero.

### 3 MÉTODOS

A literatura disponível apresenta uma variedade de diferentes abordagens utilizadas para estudar as relações entre águas subterrâneas e águas superficiais, estas passam por separação de hidrogramas de escoamento (ver a revisão apresentada por BRODIE e HOSTETLER, 2005), modelação (SOPHOCLEUS e PERKINS, 2000), traçadores (LERCH, 2005), diferenças de temperatura (CONSTANTZ *et al.*, 2008), entre outras (ver revisão apresentada por WINTER, 1995). A separação de hidrogramas é provavelmente a abordagem mais utilizada para estimar as interações entre águas subterrâneas e superficiais (OPSAHL *et al.* 2007).

#### 3.1 Balanço Hídrico

Tendo como base a análise apresentada por BAILLY-COMTE *et al.* (2008), considerou-se, para o presente estudo, que os volumes envolvidos nas interações rio-aquífero, que ocorrem entre o QS e os cursos de água que o atravessam, podem ser descritos por um balanço hídrico aplicado às sub-bacias dos cursos de água que atravessam o sistema QS, esquematizado na Figura 2. Desta forma, os volumes de escoamento registados nas estações hidrométricas quando as ribeiras abandonam a área do sistema aquífero (Es) podem ser expressos como a soma do escoamento directo gerado nas rochas paleozóicas da serra (EdE), com o escoamento directo gerado na área do sistema aquífero (EdA), menos o volume de água que se infiltra em troços e pontos influentes ao longo das ribeiras

contribuindo como recarga para o aquífero (RR), menos a evaporação que ocorre a partir da ribeira (Ev) que é praticamente nula em episódios de chuva intensos, mais as contribuições subterrâneas que ocorrem nos pontos e troços efluentes e registadas como escoamento de base (Eb) na estação à saída do aquífero:

$$ES = EdE + EdA - RR + Eb - Ev \quad (1)$$

onde:

Es – escoamento de saída (m<sup>3</sup>), medido nas estações hidrométricas quando as ribeiras abandonam a área do sistema aquífero;

EdE – escoamento directo de entrada (m<sup>3</sup>), gerado nas rochas paleozóicas da serra;

EdA – escoamento directo (m<sup>3</sup>), gerado na área do sistema aquífero;

RR – recarga (m<sup>3</sup>);

Eb – escoamento de base (m<sup>3</sup>), medido na estação à saída do aquífero;

Ev – evaporação (m<sup>3</sup>).

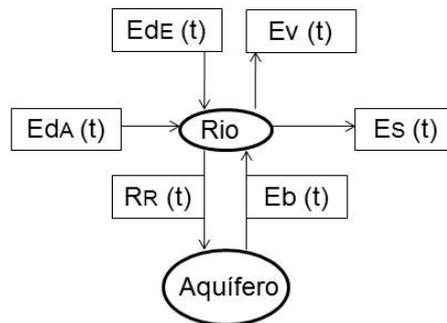


Figura 2 Balanço hídrico das relações rio-aquífero no QS

### 3.2 Dados Hidrométricos

A localização e os dados diários registados pela rede de monitorização instalada especificamente com o objectivo de quantificar as entradas e saídas de água, nos sistemas aquíferos do Algarve, a partir das linhas de água foram disponibilizados pela ARH Algarve. Estes dados são também disponibilizados pelo INAG através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). A localização das estações hidrométricas desta rede que monitoriza os volumes de escoamento das ribeiras que atravessam o sistema QS encontra-se representada na Figura 1, e na Figura 3 representa-se a disponibilidade dos dados registados para cada estação.

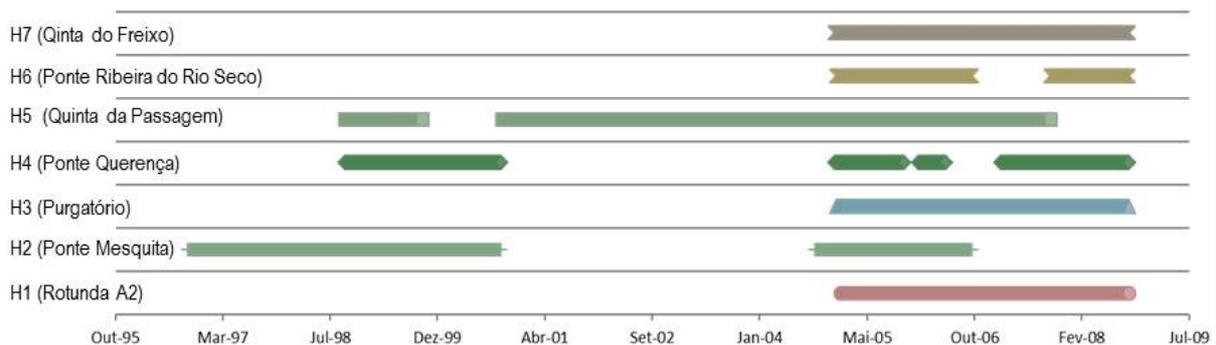


Figura 3 - Identificação das estações hidrométricas e dos dados disponíveis

Esta rede é relativamente recente pelo que ainda não se encontra totalmente otimizada. As estações hidrométricas que registam os volumes de escoamento superficial gerado nas rochas paleozóicas da serra (EE) por razões técnicas não se encontram localizadas de modo a registar todo o

escoamento gerado nestas sub-bacias. Desta forma, estimou-se EdE recorrendo-se ao modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD (OLIVEIRA e OLIVEIRA, em preparação). Na próxima secção apresenta-se uma explicação mais detalhada da aplicação deste modelo. Salienta-se no entanto que os volumes de escoamento registados nestas estações permitiram aferir a qualidade dos dados estimados recorrendo à metodologia BALSEQ\_MOD.

As bacias hidrográficas das estações hidrométricas que registam os volumes de escoamento de entrada (EE) e de saída (Es) foram definidas tendo como base de trabalho as delimitações disponibilizadas pelo Instituto da Água, I. P. (INAG) através da ferramenta InterSIG, às quais se sobrepuseram, em ambiente SIG, as cartas militares de Portugal na escala 1:25 000 e a hidrografia disponibilizada pelo Instituto Geográfico do Exército (IGeoE), o que permitiu a sua redefinição.

### 3.3 Modelo BALSEQ\_MOD

Uma primeira aplicação deste método ao sistema aquífero Querença-Silves foi apresentada em OLIVEIRA *et al.* (2008), onde se estimou a recarga para o período de 1941-10-01 até 1991-09-30. OLIVEIRA *et al.* (2011) apresentam uma actualização deste estudo para o período 1979-10-01 até 2009-09-30. Finalmente, OLIVEIRA e OLIVEIRA (em preparação) estendem a área de aplicação deste método às áreas exteriores a este sistema aquífero mas que para ele drenam (ver Figura 1) para o mesmo período de 1979-10-01 até 2009-09-30.

O modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ\_MOD faz um balanço a nível do solo, incorporando metodologias para cálculo dos processos de infiltração no solo, evapotranspiração real e infiltração profunda do solo. Sendo a infiltração profunda considerada como um estimador da recarga do sistema aquífero (RA). Considera-se que, de acordo com o modelo conceptual subjacente à corrida do BALSEQ\_MOD, e à assunção posterior que se faz de que toda a água que precipita nas áreas de afloramento das formações carbonatadas carsificadas após um determinado percurso se infiltra, apenas existe escoamento directo em áreas que não são um afloramento de uma formação calcária carsificada. Salienta-se que o escoamento superficial gerado na sub-bacia do Polje da Nave do Barão (área a branco na bacia da estação hidrométrica H3 na Figura 1) não foi considerado como parte de (EdA) por se tratar de uma área em que o escoamento se infiltra na depressão cársica não contribuindo para os volumes das ribeiras.

Este modelo consiste numa actualização do modelo BALSEQ (LOBO FERREIRA, 1981) que utilizava processos de cálculo das variáveis do balanço hídrico diferentes. A descrição de toda a metodologia programada no modelo BALSEQ\_MOD pode ser encontrada, entre outros, em OLIVEIRA (2004), OLIVEIRA *et al.* (2008, 2011), OLIVEIRA e OLIVEIRA (em preparação).

Para correr este modelo utilizou-se a série de precipitação diária registada no posto udoográfico 30H/03 – São Bartolomeu de Messines (estação meteorológica localizada perto da estação hidrométrica H1 - Rotunda A2 na Figura 1) disponível *online* na página do SNIRH (<http://snirh.pt>); a série de evapotranspiração de referência mensal calculada para o Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve (MAOT, 2000), desde Janeiro de 1941 até Dezembro de 1991, a partir dos dados climatológicos registados na estação meteorológica da Praia da Rocha (Portimão), utilizando-se os valores médios mensais a partir de 1992; a Carta de Solos de Portugal, à escala 1:25 000, do IHERA; a cartografia de ocupação do solo Corine Land Cover 2006, do CNIG, à escala 1:100 000, e a cartografia geológica para definir as áreas carsificadas. A sobreposição da informação da carta de solos e da carta de ocupação dos solos originou diferentes combinações de solo/ocupação do solo que forneceram a informação de base necessária para a caracterização dos parâmetros necessários à corrida do modelo.

### 3.4 Metodologia DecHidr

O escoamento de um curso de água superficial (E) é composto (1) por escoamento directo (Ed), produzido na bacia hidrográfica a montante do local onde é medido, resultante da água de precipitação que não se infiltra à superfície do solo e que não fica retida (por exemplo nas copas das árvores, em edifícios, em barragens, etc.), e (2) por escoamento de base (Eb), resultante de água que se infiltra no solo, escoando subterraneamente e acaba por no seu percurso aflorar à superfície, constituindo por isso a descarga das águas subterrâneas para a bacia hidrográfica:

$$E = E_d + E_b \quad (2)$$

onde:

E – escoamento superficial (m<sup>3</sup>);

E<sub>d</sub> – escoamento directo (m<sup>3</sup>);

E<sub>b</sub> – escoamento de base (m<sup>3</sup>).

O hidrograma é a representação gráfica do escoamento superficial em função do tempo. As duas grandes componentes do escoamento (directo e de base) podem ser individualizadas no hidrograma. Para o fazer existem vários métodos (cf. e.g. LINSLEY *et al.* 1975, CUSTODIO e LLAMAS, 1976). Um destes métodos, que foi utilizado neste estudo, consiste em unir por uma linha o escoamento superficial que existe no início da curva de crescimento do hidrograma ao escoamento superficial que existe no tempo final do escoamento directo. Para determinar este tempo LINSLEY *et al.* (1975) apresentam a seguinte expressão para calcular aproximadamente o tempo desde o pico do hidrograma até um ponto seleccionado arbitrariamente na curva de esgotamento que pretende traduzir o fim do escoamento directo:

$$N = 0,827 A^{0,2} \quad (3)$$

onde:

N – número de dias;

A – área (km<sup>2</sup>).

A área acima desta linha constitui o escoamento directo do episódio de chuva em análise e a área abaixo da linha constitui o escoamento de base.

A complexidade da decomposição dos hidrogramas de escoamento reside na existência de sobreposição de episódios distintos. Neste sentido torna-se necessário desenvolver um conjunto de procedimentos que permitam a individualização dos episódios distintos de precipitação/escoamento superficial. Este assunto e uma descrição mais detalhada da metodologia de decomposição dos hidrogramas de escoamento encontra-se desenvolvido em OLIVEIRA (2001, 2004). A totalidade da metodologia foi incluída no programa de computador DecHidr\_VB.vbp. Para correr este modelo utilizou-se para a bacia hidrográfica da estação H2 - Ponte Mesquita a série de precipitação diária registada no posto udográfico 30H/03 – São Bartolomeu de Messines (estação meteorológica localizada perto da estação hidrométrica H1 - Rotunda A2 na Figura 1) e para a bacia da estação hidrométrica H3 - Purgatório a série de precipitação diária registada o posto udográfico 30I/03UG – Salir (estação meteorológica localizada perto da estação hidrométrica H6 - Ponte da Ribeira do Rio Seco na Figura 1) ambas disponíveis *online* na página do SNIRH (<http://snirh.pt>).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Dados Hidrométricos

A relação entre o escoamento superficial (Es) e a precipitação (P), foi analisada nas estações hidrométricas à saída do sistema com o objectivo de estimar volumes Es para um ano médio. Utilizaram-se para tal as médias de P da série diária de 30 anos (1978/2008) da estação meteorológica de S. Bartolomeu de Messines para a estação H2 e da série do mesmo período da estação meteorológica de Salir para as estações H3 e H5, uma vez que os dados de Eb (obtidos através da

metodologia DechHidr) foram estimados com base nos dados de P destas estações. Assim obteve-se uma média de aproximadamente 671 mm para São Bartolomeu de Messines e 720 mm para Salir. A Figura 4 apresenta a análise da relação entre os volumes de escoamento registados nas estações à saída do sistema (Es) e a precipitação (P). Os dados para a estação H3 - Purgatório são escassos tendo-se estabelecido relações ES-P, uma linear e outra exponencial, que mostram quando comparados os volumes registados com os volumes estimados por ambas as relações, melhores resultados para a relação de linearidade. O volume de Es obtido para a média de P de 30 anos é de aproximadamente 19 hm<sup>3</sup>/a. Na estação H2 - Ponte Mesquita a relação exponencial parece ser mais adequada, no entanto verificou-se ao comparar os volumes estimados por ambas as relações com os volumes registados que nos dois primeiros anos em que há registo a relação linear traduz melhor a relação ES-P, sendo a relação exponencial que melhor traduz os restantes anos. Para o cálculo do escoamento médio utilizou-se a relação de exponencialidade, tendo-se obtido um valor de Es de 0,75 hm<sup>3</sup>/ano. Para a estação H5 - Quinta da Passagem não parece existir uma boa relação, os volumes estimados por ambas as relações quando comparados com os volumes registados são bastante diferentes, contudo a relação linear apresenta resultados que aparentam ser mais assertivos. Obteve-se uma média para 30 anos de aproximadamente 23 hm<sup>3</sup>/ano. No entanto, refere-se que este valor de escoamento poderá estar sobrestimado, e não inclui as contribuições da nascente da Fonte Benémola.

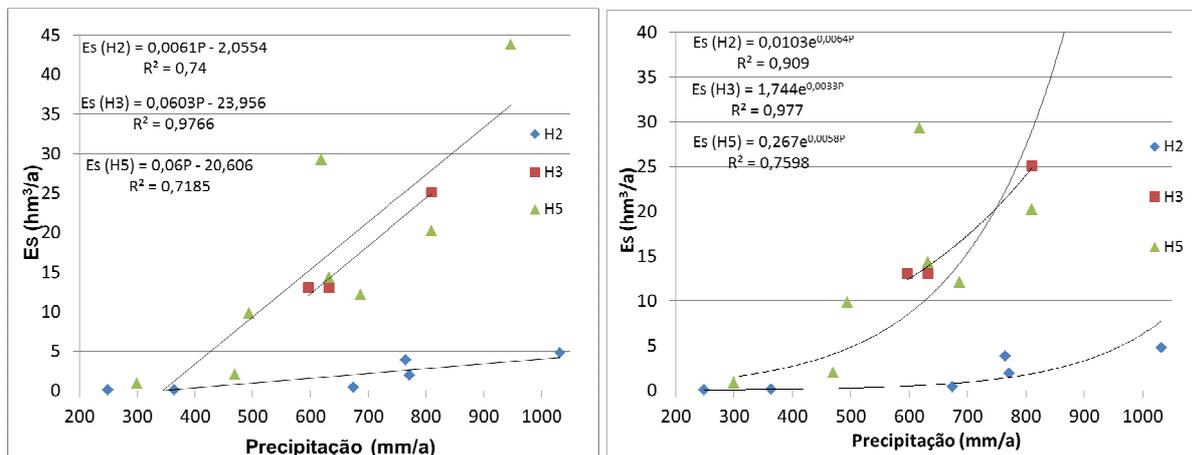


Figura 4 – Relação linear e relação exponencial entre Es e P

#### 4.2 Modelo BALSEQ\_MOD

Na Figura 5 apresentam-se os resultados de escoamento directo (Ed) estimados, para o período de 1979-10-01 até 2009-09-30, através da aplicação do método BALSEQ\_MOD à área das bacias hidrográficas das estações hidrométricas que registam os volumes de escoamento de saída (Es) para as áreas que se sobrepõe à área do sistema aquífero (EdA) e para as áreas das sub-bacias exteriores ao aquífero (EdE). Como se pode constatar na Figura 5, é nas áreas das sub-bacias exteriores ao aquífero onde é gerado a maior parte do volume de Ed, na sub-bacia de H2 este valor é cerca de 98,6% e na sub-bacia de H3 cerca de 71,3%. De referir que, para o referido período, do EdA estimado para a bacia da estação H3 97,4% escoam para as ribeiras, o restante corresponde ao escoamento superficial gerado na área da sub-bacia hidrográfica da depressão cársica do Polje da Nave do Barão (área a branco na Figura 5) onde o escoamento superficial não contribui para o escoamento das ribeiras. Desses 97%, cerca de 81% é gerado na área da sub-bacia da Ribeira do Algibre, 13 % na sub-bacia da Ribeira de Alte e 5% na sub-bacia da Ribeira da Menalva.

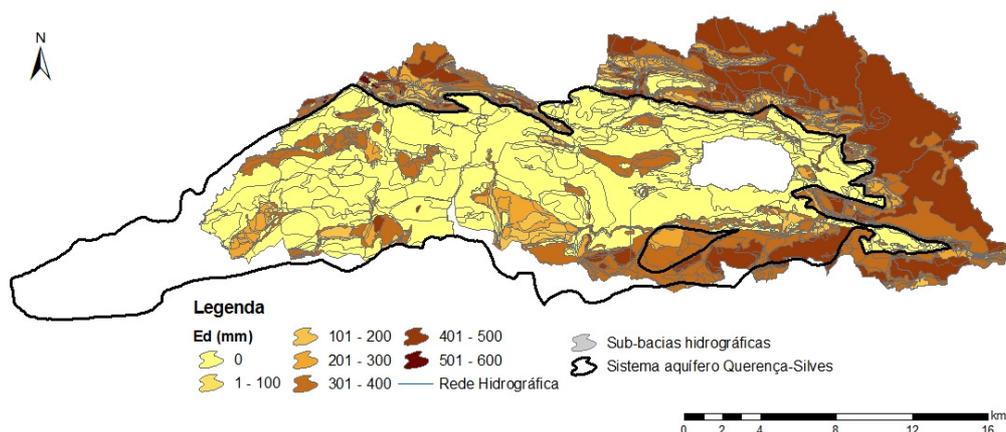


Figura 5 – Resultados de escoamento directo (Ed) estimado pelo modelo BALSEQ\_MOD na área do aquífero - Eda na Eq.(1) e nas sub-bacias fora da área do aquífero - EdE na Eq.(1)

Os volumes de EdE estimados através do modelo BALSEQ\_MOD foram comparados, para cada sub-bacia, com os volumes registados nas estações hidrométricas a montante do sistema aquífero (EE), para os anos em que existem dados hidrométricos para anos hidrológicos completos. Os volumes de EdE estimados para a bacia da estação hidrométrica H4 - Ponte de Querença parecem sobreestimados (ver Quadro 1) e não incluem as contribuições das nascentes que alimentam a ribeira a montante desta estação. Para a bacia da estação hidrométrica H6 - Ponte da Ribeira do Rio Seco só existem dois anos com registo completo, neste caso os volumes estimados são da mesma ordem de grandeza dos valores registados (ver Quadro 1), no entanto são necessários mais registos para que se possa efectuar uma análise mais detalhada e aferir a qualidade dos volumes estimados. Para a bacia da estação hidrométrica H7 - Quinta do Freixo os volumes parecem subestimados (ver Quadro 1), mas mais uma vez existem apenas três anos hidrológicos de registo completo. Para a bacia da estação hidrométrica H1 - Rotunda A2, e tal como se pode verificar no Quadro 1 os volumes parecem sobreestimados, no entanto mais uma vez seriam necessários mais registos para se poder efectuar uma análise mais detalhada e aferir a qualidade dos volumes estimados.

Quadro 1 – Comparação entre os volumes de EdE estimados através do modelo BALSEQ\_MOD e os volumes de EE medidos nas estações hidrométricas

Estação hidrométrica	Anos	EdE (hm <sup>3</sup> ) estimado BALSEQ_MOD	EE (hm <sup>3</sup> ) medido na estação
H4 – Ponte Querença	1998/1999	6,01	0,12
	1999/2000	11,53	2,42
	2007/2008	10,73	4,66
H6 – Ponte Ribeira do Rio Seco	2005/2006	11,57	11,10
	2007/2008	9,56	5,08
H7 – Quinta do Freixo	2005/2006	0,54	1,31
	2006/2007	0,45	0,62
	2007/2008	0,45	0,57
H1 – Rotunda A2	2005/2006	1,54	0,35
	2006/2007	1,29	0,76
	2007/2008	1,27	0,37

### 4.3 Metodologia DecHidr

A relação entre o escoamento de base (Eb) e o escoamento superficial (Es), foi analisada nas estações à saída com o objectivo de estimar volumes Eb para um ano médio. Utilizaram-se para tal as médias de Es estimadas para as séries de P diárias para 30 anos (1978/2008) obtidas através da análise das relações Es-P. A Figura 6 apresenta a análise da relação entre os volumes de escoamento de base estimados através da separação de hidrogramas, e os volumes de escoamento registados nas estações à saída do sistema (Es), recorrendo ao programa DecHidr. Os resultados demonstram que para a estação H3 quando comparados os volumes de Eb estimados pelo DecHidr com os volumes estimados por ambas as relações, obtêm-se melhores resultados para a relação de linearidade. Obtendo-se um valor médio de 30 anos para Eb de 3,43 hm<sup>3</sup>/ano, cerca de 18% de Es. No entanto, os resultados deixam dúvidas quanto à qualidade da relação linear Eb-Es, uma vez que só existem três valores de Es registados, e consequentemente três valores de Eb, e que para dois desses valores (2006/2007 e 2007/2008) para volumes relativamente semelhantes de Es têm-se valores de Eb estimados pelo DecHidr bastante diferentes, o valor de Eb em 2006/2007 é o dobro do Eb no ano 2007/2008. Para a estação H2 verificou-se que, ao comparar Eb estimados pelo DecHidr e Eb estimados por ambas as relações, a relação exponencial parece ser mais adequada, tendo-se obtido um valor de média de 30 anos de cerca de 0,00888 h<sup>3</sup>m/ano, que corresponde a cerca de 1% do Es. Para a estação H5 a relação Eb - Es é bastante boa, isto deve-se ao facto da nascente da Fonte Benémola se encontrar a descarregar para a linha de água mesmo a montante desta estação hidrométrica. Desta forma obteve-se um valor médio para 30 anos de 11,4 hm<sup>3</sup>/ano, cerca de 51% do escoamento superficial (Es).

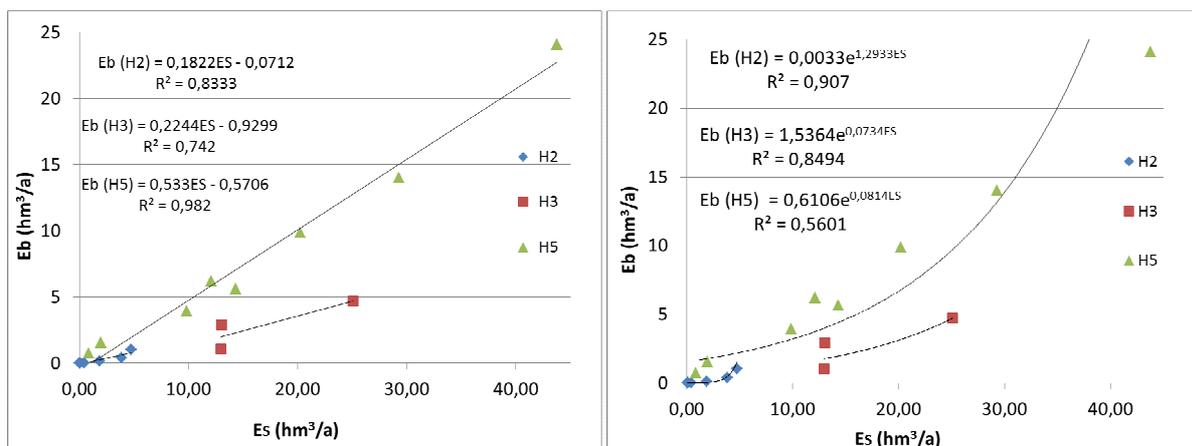


Figura 6 - Relação linear e relação exponencial entre Eb e Es

### 4.4 Balanço hídrico

De modo a quantificar as entradas (RR) de água do sistema QS a partir das ribeiras aplicaram-se os resultados obtidos anteriormente (Es, EdE, EdA, Eb) ao balanço hídrico expresso pela Eq. (1) para as duas estações hidrométricas localizadas quando as ribeiras saem do aquífero, estações H2 e H3 na Figura 1, obtendo-se assim uma primeira estimativa dos volumes envolvidos nas trocas entre as ribeiras e o sistema aquífero, para um ano médio. Sintetizam-se todos os resultados no Quadro 2. Uma vez que os dados disponíveis o permitiram aplicou-se ainda o balanço hídrico à estação H5, o que permite caracterizar as interacções rio-aquífero na área da bacia hidrográfica desta estação.

Quadro 2 – Resultados do balanço hídrico

	Estação hidrométrica		
	H2	H3	H5
Es (hm <sup>3</sup> /ano)	0,75	19,45	22,54
EdE (hm <sup>3</sup> /ano)	5,44	45,85	33,64
EdA (hm <sup>3</sup> /ano)	0,08	18,49	0,99
Eb (hm <sup>3</sup> /ano)	0,01	3,43	11,44
Ev (hm <sup>3</sup> /ano)	0	0	0
RR (hm <sup>3</sup> /ano)	4,77	51,67	23,54
RR (%)	13,30	54,43	73,99
RA (%)	86,70	45,57	26,01
P (mm)	671	720	720

Deste balanço tem-se para a bacia da estação H2 - Ponte Mesquita que cerca de 5 hm<sup>3</sup>, 86 % do escoamento superficial (E) gerado dentro e fora do aquífero nesta bacia, se infiltra em troços e pontos influentes contribuindo para a recarga do sistema aquífero (RR). Correspondendo este volume a cerca de 5 % da recarga actualmente estimada para a totalidade do sistema aquífero (RA) de 94 hm<sup>3</sup> (OLIVEIRA *et al.*, 2011), que apenas considera as entradas directas ocorridas na área do sistema aquífero. Para a bacia da estação H3 - Purgatório tem-se que cerca de 52 hm<sup>3</sup>, 76 % do E gerado dentro e fora do aquífero nesta bacia, se infiltra em troços e pontos influentes contribuindo para a recarga do sistema aquífero. Correspondendo este volume a cerca de 55 % da RA estimada para todo o QS. Para a bacia da estação H5 – Quinta da Passagem tem-se que cerca de 24 hm<sup>3</sup>, 51 % do E gerado dentro e fora do aquífero nesta, se infiltra em troços e pontos influentes contribuindo para a recarga do sistema aquífero. Correspondendo este volume a cerca de 35 % do E total da bacia H3 e 25 % da RA estimada para todo o QS.

Para a totalidade do sistema tem-se que cerca de 56 hm<sup>3</sup>, 77 % de E se infiltra em troços e pontos influentes contribuindo para a recarga do sistema aquífero. Correspondendo este volume a cerca de 60 % da RA estimada para todo o QS. Salienta-se o facto destes volumes serem muito provavelmente sobreestimados, uma vez que a análise das estimativas de EdE demonstrou que os volumes de escoamento directo gerado nas rochas paleozóicas da serra estimados pela aplicação do modelo BALSEQ\_MOD, poderão ser sobreestimados.

## 5 DISCUSSÃO

A análise dos hidrogramas observados confirma claramente as características intermitentes do regime hidrológico das ribeiras que cruzam o sistema QS, um comportamento típico das regiões mediterrânicas, caracterizado por picos de cheia e períodos secos. O rápido tempo de resposta destes cursos de água a episódios de chuva intensa leva a que grande parte do escoamento que circula nas ribeiras chegue ao mar em poucas horas. A análise dos dados hidrométricos existentes permitiu perceber que as estações hidrométricas, localizadas nas ribeiras quando estas entram na área do sistema aquífero, não se encontram a registar todo o escoamento superficial gerado nas rochas paleozóicas da serra. Ainda que, estes volumes não sejam representativos do escoamento gerado nestas sub-bacias, foi possível verificar, ao comparar os dados diários de entrada (EE) e de saída (ES), que para alguns episódios de chuva menos intensos os volumes de escoamento são totalmente absorvidos pelo sistema, não se verificando escoamento de saída.

Os dados destas estações permitiram ainda aferir a qualidade dos volumes estimados. De modo geral, os volumes de escoamento EdE estimados com o modelo BALSEQ\_MOD para as bacias hidrográficas destas estações hidrométricas quando comparados com o valor registado pelas estações

parecem sobreestimados. No entanto, não se exclui a hipótese de serem os registos desta estação que estejam subavaliados, quer por eventuais erros na determinação da altura hidrométrica quer por deficiente definição da curva de vazão. Importa referir o caso em que esta situação é mais relevante, na bacia hidrográfica da estação hidrométrica H4 os valores de EdE estimados parecem bastante sobreestimados, mesmo não considerando os caudais das nascentes que se localizam nesta sub-bacia, estas diferenças poderão estar relacionadas com o facto de parte da bacia desta estação se sobrepor com a área dos calcários que suportam o sistema QS podendo existir sumidouros localizados na ribeira antes da estação hidrométrica. Salienta-se o facto da rede hidrométrica ser recente e de ainda não existir um registo contínuo destes volumes, situação que importa rever de acordo com as disponibilidades técnicas existentes, dada a importância de uma boa rede de monitorização para a caracterização destas relações rio-aquífero. Para se poder efectuar uma análise estatística e uma análise mais detalhada que permita uma calibração dos dados estimados recorrendo à metodologia BALSEQ\_MOD seriam necessários registos de mais anos. Uma vez que esta análise se mostrou inconclusiva, de modo a obter uma primeira estimativa dos volumes envolvidos nas interações rio-aquífero, optou-se por utilizar de qualquer forma no balanço hídrico os volumes de EdE estimados pela aplicação do modelo BALSEQ\_MOD, tendo sempre em consideração de que estes valores poderão ser sobreestimados.

Relativamente à análise das relações Es-P e Eb-Es importa salientar mais uma vez a importância de ter um registo contínuo dos volumes de escoamento das ribeiras que atravessam o sistema QS, uma vez que também nestas análises o baixo número de registos influencia e limita as conclusões que se podem retirar. Na bacia hidrográfica da estação H2 - Ponte Mesquita tanto os volumes de escoamento superficial (Es) como os volumes de escoamento de base (Eb), apresentam uma melhor resposta à relação exponencial com a precipitação (P). Esta relação exponencial talvez se relacione com o facto do Es desta ribeira ser maioritariamente composto por escoamento directo originado nas rochas paleozóicas da serra (ver Figura 5 e Quadro 2). Na bacia hidrográfica da estação H5 - Quinta da Passagem não parece existir uma boa relação entre Es-P enquanto existe uma relação muito boa entre Eb-Es, estes dados demonstram claramente a grande contribuição da nascente da Fonte Benémola para o escoamento de superfície, onde o Eb corresponde a cerca de metade do escoamento de superfície.

Mais uma vez a análise das relações Es-P e Eb-Es, neste caso para a bacia da estação H3 – Purgatório, demonstra claramente a necessidade de informação que existe para que se consigam definir as relações rio-aquífero num sistema cársico como o QS. Neste caso só existem três anos de dados que indicam uma resposta linear do escoamento superficial (Es) relativamente à precipitação (P), no entanto esta mesma relação não se verifica em termos de escoamento de base (Eb). Curioso o facto de que em dois anos consecutivos (2006/2007 e 2007/2008) com apenas 30 mm de P de diferença gerem volumes de Es relativamente iguais e volumes Eb com o dobro da diferença. Esta diferença entre as contribuições subterrâneas, indicam que neste caso o Eb não está directamente relacionado com a quantidade de precipitação ocorrida para um ano, mas que a explicação para tal poderá estar relacionada com a intensidade e duração de cada episódio de chuva, com as condições iniciais do sistema e com a capacidade de infiltração das condutas cársicas. Seria pois importante aprofundar o estudo da precipitação através da determinação de curvas de intensidade-duração-precipitação (IDF). Seria igualmente importante aprofundar o conhecimento sobre a localização das condutas cársicas, definir a capacidade de infiltração das condutas e estudar simultaneamente a resposta destes locais a episódios de chuva de modo a caracterizar o seu funcionamento hidráulico. Estas condutas cársicas alternam entre comportamento influente e efluente de acordo com o gradiente hidráulico entre as águas subterrâneas e superficiais. BAILLY-COMTE *et al.* (2008) demonstram a importância de uma caracterização do estado inicial do sistema e BAILLY-COMTE *et al.* (2009) referem que o estudo da temperatura-condutividade pode ajudar a perceber se a água presente nestas

condutas cársicas é originada por escoamento directo, escoamento de base ou pelos dois. Os autores apresentam uma análise das respostas hidrodinâmicas de um curso de água de um sistema cársico (escoamento superficial-temperatura-condutividade) e de poços e condutas cársicas ao longo deste (nível de água-temperatura-condutividade).

Relativamente ao balanço hídrico que permite apresentar nesta comunicação uma primeira estimativa dos volumes envolvidos nas trocas de água entre o QS e as ribeiras que o atravessam, para um ano médio, há a salientar que os volumes envolvidos nestas trocas são muito mais significativos na sub-bacia da Ribeira de Quarteira. Salienta-se o facto destes volumes apresentados poderem ser sobreestimados, uma vez que a análise das estimativas de EdE indica que os volumes de escoamento directo gerado nas rochas paleozóicas da serra estimados pela aplicação do modelo BALSEQ\_MOD, poderão ser sobreestimados. De referir ainda que outra razão para estes valores serem considerados como sobreestimados reside no facto que para o balanço hídrico aplicado à bacia da estação H3 não foi considerado, por não se encontrar actualmente contabilizado, o volume de escoamento superficial exportado através da Ribeira de Paderne.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este estudo mostra claramente, apesar dos volumes apresentados parecerem sobreestimados, a importância de uma caracterização das interações que ocorrem entre águas subterrâneas e superficiais, nomeadamente para o sistema aquífero Querença-Silves. Tanto na perspectiva de investigação quer como incremento dos níveis de conhecimento, quer como suporte a outros estudos. Como na perspectiva de gestão colmatando necessidades de conhecimento que permitam dar resposta aos níveis de exigência da DQA ou simplesmente em resposta às exigências regionais de uma nova perspectiva de gestão integrada dos recursos hídricos.

Este conhecimento pode ainda ser muito importante a nível regional quando aliado aos conhecimentos tradicionais da gestão da água, uma vez que a criação de pequenos açudes em locais estratégicos, nomeadamente logo após pontos e troços influentes e entre locais efluentes, pode potenciar a recarga artificial passiva do sistema aquífero, ao mesmo tempo que produz um efeito de atenuação de cheias a jusante destes locais.

Dada a complexidade destas interações torna-se importante aprofundar este conhecimento, quer em termos de uma análise mais detalhada da distribuição da precipitação e a sua relação com os volumes de escoamento gerados, recorrendo por exemplo a curvas de intensidade-duração-precipitação (IDF), quer em termos da definição da capacidade de infiltração das condutas cársicas e a sua resposta a eventos de precipitação, o que poderá ser conseguido recorrendo por exemplo ao uso de traçadores fluorescentes.

Salienta-se ainda a importância de uma rede de monitorização representativa que permita o registo contínuo dos volumes de escoamento dos cursos de água que atravessam o sistema aquífero, uma vez que um baixo número de registos, influencia e limita as conclusões que se podem retirar acerca da caracterização das relações rio-aquífero, não permitindo avaliar, através de uma calibração e validação das simulações efectuadas, a fiabilidade dos resultados obtidos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradece-se à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento concedido, através do projecto "PTDC/AAC-AMB/105061/2008 - Água, ecossistemas aquáticos e actividade humana. Uma abordagem integrada e participativa na definição de estratégias inovadoras e prospectivas de gestão integrada de recursos hídricos no Sul de Portugal – PROWATERMAN" ao abrigo do qual se desenvolveu a investigação descrita na presente comunicação.

## BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, C. – Hidrogeologia do Algarve Central. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Lisboa (Portugal), Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia da FCUL, 1985.
- ALMEIDA, C.; MENDONÇA, J.J.L.; JESUS, M.R.; GOMES, A.J. – “Sistemas Aquífero de Portugal Continental”. Relatório INAG. Lisboa (Portugal), 2000.
- BAILLY-COMTE, V.; JOURDE, H.; PISTRE, S. – “Conceptualization and classification of groundwater-surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds: Case of the karst watershed of the Coulazou River (Southern France)”. *Journal of Hydrology*, **376**, 3-4, Outubro 2009, pp. 456-462.
- BAILLY-COMTE, V.; JOURDE, H.; PISTRE, S.; BAIOT-GUILHE, C. – “Time series analyses for karst/river interactions assessment: case of the Coulazou river (southern France)”. *Journal of Hydrology*, **349**, 1-2, 2008, pp. 98-114.
- BRODIE, R.S.; HOSTETLER, S. – “A Review of Techniques for Analysing Baseflow from stream hydrographs” in *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference*, Auckland, New Zealand, 28 Nov – 2 Dez. 2005.
- CONSTANTZ, J.; NISWONGER, R.G.; STEWART, A.E. - “Analysis of Temperature Gradients to Determine Stream Exchanges with Ground Water”, in *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*, editado por Rosenberry, D.O., LaBaugh, J.W., Reston, Virginia (EUA), U.S. Geological Survey, 2008, pp. 115 - 128.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. - *Hidrologia Subterránea*. Barcelona (Espanha), Ediciones Omega, SA., 1976.
- GUNN, J. – “Point-recharge of limestone aquifers - A model from New Zealand karst”. *Journal of Hydrology*, **61**, 1983, pp. 19 - 29.
- HUGMAN, R.T.; STIGTER, T.S.; MONTEIRO, J.P.; NUNES, L. - “Influence of aquifer properties and the spatial and temporal distribution of recharge and abstraction on sustainable yields in semi-arid regions”, *Hydrological Processes*, inpress, DOI: 10.1002/hyp.8353.
- LERCH, R.N.; WICKS, C.M.; MOSS, P.L. – “Hydrologic characterization of two karst recharge areas in Boone County, Missouri”. *Journal of Cave and Karst Studies*, **67**, 3, Dezembro 2005, pp. 158-173.
- LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. - *Hydrology for Engineers*. New York (EUA). McGraw Hill Kogakusha, Ltd., Second Edition, 1975.
- LOBO FERREIRA, J.P. – “Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce (Lack) Hydrogeological Data”. *Proceedings of Euromech 143/2-4 Setp.1981*, Rotterdam, A.A. Balkema (Ed. A. Verruijt e F.B.J. Barends), 1981. Também: Memória Nº 582, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1982.
- MAOT - Anexo 6 – Utilizações e Necessidades da Água; Tomo 6B – Avaliação das necessidades actuais de água; Parte II – Agricultura e Agropecuária (Versão Provisória); Apêndice III – Evapotranspiração de referência. Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve; 1ª Fase, 2000.
- MONTEIRO, J. P. – “Mudanças no Uso, Gestão e Conhecimento da Água na Segunda Metade do Século XX – o Caso do Algarve” in *5º Congresso Ibérico sobre Gestão e Planeamento da Água*. Faro (Portugal), Fundação Nova Cultura da Água, Dezembro 2006, 10pp.
- MONTEIRO, J. P.; MATOS SILVA, J.; GUERREIRO, P.; MARTINS, J.; REIS, E. – “Modelação de Relações entre Águas Superficiais e Subterrâneas nos Aquíferos Do Algarve Central” in *Actas do Seminário sobre Águas Subterrâneas*. Lisboa (Portugal), Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1-2 Março 2007a.
- MONTEIRO, J.P.; RIBEIRO, L.; MARTINS, J. – “Modelação Matemática do Sistema Aquífero Querença-Silves. Validação e Análise de Cenários”. Relatório Técnico. Lisboa (Portugal), Instituto da Água (INAG), Janeiro 2007b, pp. 45.
- MONTEIRO, J.P.; RIBEIRO, L.; REIS, E.; MARTINS, J.; MATOS SILVA, J.; SALVADOR, N. – “Modelling Stream-Groundwater Interactions in the Querença-Silves Aquifer System”. Ribeiro, L. et al. (Eds), *Selected papers on Hydrogeology, Volume 17 - Groundwater and Ecosystems*. Taylor & Francis Books, Oxon, UK, inpress.
- MONTEIRO, J.P.; VIEIRA, J.; NUNES, L.; YOUNES, F. – “Inverse Calibration of a Regional Flow Model for the Querença-Silves Aquifer System (Algarve-Portugal)”, in *Proc. of the International Congress on Integrated Water Resources Management and Challenges of the Sustainable Development*, Marrakech (Marrocos), 23-25 Maio 2006, p. 44 (CD 6 pp.).
- NICOLAU, R. – “Modelação e mapeamento da distribuição espacial da precipitação – Uma aplicação a Portugal Continental. Dissertação para obtenção do grau de Doutor”. Lisboa (Portugal), Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2002.
- OLIVEIRA, M.M. - "A Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas a Partir da Decomposição de Hidrogramas de Escoamento Superficial – O Programa de Computador DECHIDR\_VB.VBP", in *Seminário sobre "A Hidroinformática*

- em Portugal”, Lisboa (Portugal), Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Publicação em CD-ROM, 15-16 Novembro, 2001.
- OLIVEIRA, M.M. – “Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação”. Doutoramento em Geologia (Hidrogeologia), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, 440 pp., 2004. Também: Teses e Programas de Investigação - TPI 42, ISBN 972-49-2093-3, Editora LNEC, 2006.
- OLIVEIRA, M.M.; OLIVEIRA, L.; LOBO FERREIRA, J.P. – “Estimativa da recarga natural no sistema aquífero de Querença-Silves (Algarve) pela aplicação do modelo BALSEQ\_MOD” in 9.º Congresso da Água - Água: desafios de hoje, exigências de amanhã, Cascais (Portugal), 2 - 4 Abril 2008, CD.
- OLIVEIRA, L.G.S.; LEITÃO, T.E.; LOBO FERREIRA, J.P.; OLIVEIRA, M.M.; NOVO, M.E. - “Água, Ecossistemas Aquáticos e Actividade Humana – Projecto PROWATERMAN. Terceiro Relatório Temático – Resultados Quantitativos e Qualitativos das Campanhas de 2011 e Balanços Hídricos”. Referência do Projecto n.º PTDC/AAC-AMB/105061/2008, 2011, 99 pp.
- OLIVEIRA, M.M.; OLIVEIRA, L.G. – “Estimativa da recarga e do escoamento directo na área de drenagem do sistema aquífero Querença-Silves”. LNEC (Portugal), Em preparação.
- OPSAHL, S.P.; CHAPAL, S.E.; HICKS, D.W.; WHEELER, C.K. – “Evaluation of ground-water and surface-water exchanges using streamflow difference analyses”. *Journal of the American Water Resources Association*, **43**, 5, Outubro 2007, pp.1132- 1141.
- PALMER, A.N. - “Hydrogeologic control of cave patterns”, in *Speleogenesis-evolution of karst aquifers*, editado por Klimchouk A.B., Ford, D.C.; Palmer, A.N.; Dreybrodt, W, National Speleological Society Inc., Huntsville, Alabama (EUA), 2000, p. 77-90.
- REIS, E., GAGO, C., BORGES, G., MATOS, M., CLÁUDIO, A., MENDES, E., SILVA, A., SERAFIM, J., RODRIGUES, A., CORREIA, S. – “Contribuição para o Cálculo do Balanço Hídrico dos Principais Sistemas Aquíferos do Algarve”. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve, 2007.
- SILVA, M. L. – “Hidrogeologia do Miocénico do Algarve. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Geologia”. Lisboa (Portugal), Universidade de Lisboa, Departamento de Geologia da FCUL, 1988.
- SOPHOCLEOUS, M. “Interactions between groundwater and surface water: the state of the science”. *Hydrogeology Journal*, **10**, Janeiro 2002, pp. 52–67.
- SOPHOCLEOUS, M.; PERKINS, S.P. – “Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas”. *Journal of Hydrology*, **236**, July 2000, pp. 185 – 201.
- STIGTER, T.Y.; MONTEIRO, J.P.; NUNES, L.M.; VIEIRA, J.; CUNHA, M.C.; RIBEIRO, L.; NASCIMENTO, J.; LUCAS, H. - “Screening of sustainable groundwater sources for integration into a regional drought-prone water supply system”. *Hydrology and Earth System Sciences*, **13**, Março 2009, pp. 1185-1199.
- TAYLOR, C.J.; GREENE, E.A. – “Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology”, in *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*, editado por Rosenberry, D.O., LaBaugh, J.W., Reston, Virginia (EUA), U.S. Geological Survey, 2008, pp. 71 - 114.
- TERRINHA, P.A.G. – “Structural Geology and Tectonic Evolution of the Algarve Basin, South Portugal, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Filosofia”. Londres (Inglaterra), University of London, Department of Geology, 1998, 430 pp.
- UE - “Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro de 2000, que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da água”, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, L327, Outubro de 2000, pp. 1-72.
- WHITE, W.B. - *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York (EUA), Oxford University Press, 1988.
- WINTER, T.C. – “Recent Advances in Understanding the Interaction of Groundwater and Surface Water”. *Review of Geophysics*, **33** (Suppl), 1995, pp. 985-994.
- WINTER, T.C., HARVEY, J.W., FRANKE, O.L., ALLEY, W.M. – *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. Denver, Colorado (USA), US Geological Survey Circular 1139, 1998.