

**A APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS (*TIME SERIES ANALYSIS*) NO ESTUDO DA DINÂMICA HIDROLÓGICA DOS SISTEMAS CÁRSICOS. PRIMEIROS RESULTADOS PARA O MACIÇO DE SICÓ (LITORAL-CENTRO DE PORTUGAL)**

Isabel Paiva  
Universidade de Coimbra  
isabelrp@ci.uc.pt

Catarina Ramos  
Universidade de Lisboa  
luciogeo@ci.uc.pt

Lúcio Cunha  
Universidade de Coimbra  
catramos@campus.ul.pt

**EIXO TEMÁTICO: GEOECOLOGIA DAS PAISAGENS, BACIA HIDROGRÁFICAS, PLANEJAMENTO AMBIENTAL E TERRITORIAL**

**Resumo**

Este artigo centra-se na aplicação da análise de séries temporais (*time series analysis*) ao estudo da hidrodinâmica subterrânea do maciço de Sicó (região centro de Portugal), dado tratar-se de uma das principais ferramentas para o conhecimento da dinâmica hidrogeológica dos aquíferos cársicos e que, indirectamente, fornece informações sobre as características físicas internas do sistema cársico, particularmente do grau de carsificação e da eficiência da rede de circulação interna. Mediante os resultados obtidos a partir da utilização desta metodologia na série dos caudais diários das nascentes dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão bem como da precipitação diária ao longo de 2 anos hidrológicos (2009/10-2010/11) começa-se a perceber que este sistema cársico tem um comportamento dual. Por um lado, apresenta uma rápida resposta a episódios de elevada precipitação (revelados pelo curto atraso entre o *input* e o *output*); por outro lado, revela um claro predomínio do escoamento de base, resultante de uma grande capacidade de armazenamento de água no seu interior, mostrados pela elevada atenuação e filtragem do sinal de *input*, obtidas na análise espectral.

**Palavras-chave:** análise de séries temporais (*time series analysis*); aquíferos cársicos, relação *input-output*; escoamento directo (*quickflow*); escoamento de base (*baseflow*)

**Abstract**

The present study aims to know the hydrological dynamic of karst massif of Sicó (centre of Portugal). Furthermore, this paper demonstrates that time series analyses (correlation and spectral analysis) can contribute highly to understand the hydrodynamic behaviour of karst aquifers and deduce physical characteristics of the system (degree of karstification, storage capacity). The available data consists of 2 springs flow rates (Olhos d'Água do Anços and Ourão) and the precipitation for 2 hydrological years (2009/2010 and 2010/2011). The application of univariate (autocorrelation and spectral analysis) and bivariate analysis (cross-correlation, cross-amplitude, coherence, gain and phase functions) shows a bimodal hydrodynamic behaviour of this karst system. The results demonstrate a fast response to input signal suggesting a developed and well-organized conduit network which quickly drains the aquifer (predominance of *quickflow*). On the other hand, the long impulse response indicates the strong memory of the system, which hardly filters and attenuates the signal of precipitation. The dominant influence of *baseflow* on the spring discharge shows the large storage capacity of the karst system.

**Key words:** time series analysis; karst aquifers; input-output relationship; *quickflow*; *baseflow*

## 1. Introdução

O carácter fortemente heterogéneo de que se revestem os sistemas cársicos impossibilita a utilização de metodologias usualmente aplicadas noutro tipo de aquíferos para a identificação e compreensão de características internas dos aquíferos. Assim, a primeira abordagem no estudo dos aquíferos cársicos, principalmente os menos conhecidos, deve residir em considerarmos estes sistemas como uma *black-box*<sup>1</sup>, em que a circulação subterrânea é compreendida através da análise da água que entra no sistema ou *input* (precipitação, linhas de água que se perdem nos sumidouros) – e da que sai ou *output* (caudal das exurgências). O sistema aquífero cársico é, deste modo, caracterizado pela sua resposta à entrada de água no sistema (Mangin, 1994).

A utilização de informação (precipitação, caudal das nascentes, níveis piezométricos) e metodologias que permitam estimar a relação *input-output* (análise do hidrograma das nascentes ou apenas da curva de recessão e análise das séries temporais – *time series analysis*) constituem importantes ferramentas, não só na compreensão do funcionamento hidrológico geral do sistema cársico, como também na identificação de características internas do sistema, que controlam esse mesmo funcionamento (grau de carsificação, dimensão das condutas subterrâneas, organização do sistema de drenagem interna do maciço). Este método, analisado e implementado por Mangin (1975) e aperfeiçoado por Marsaud (1997) surge como o de utilização mais simples e o mais apropriado para essa finalidade (El-Hakim e Bakalowicz, 2006). Esta abordagem tem sido, aliás, largamente utilizada em vários estudos nas últimas décadas, dos quais se destacam (Mangin, 1975; Mangin, 1984; Pullido-Bosch *et al.*, 1995; Morales-Juberias *et al.*, 1996; Angelini, 1997; Marsaud, 1997; Larocque *et al.*, 1998; Labat *et al.*, 2000; Samani, 2001; Petric, 2002; Mathevet *et al.*, 2004; Rahmemaie *et al.*, 2005; Panagopoulos e Lambrakis, 2006, Jemcov e Petric, 2009; Kovacic, 2010).

A abordagem e a metodologia utilizadas neste estudo enquadram-se na perspectiva de análise dos aquíferos cársicos acima apresentada, o que se justifica pelo desconhecimento, quer da estrutura interna, quer do comportamento hidrodinâmico do maciço de Sicó, dada a inexistência de qualquer estudo aprofundado. Por conseguinte, constitui principal objectivo deste artigo o conhecimento, ainda que em fase inicial, da hidrodinâmica interna geral deste sistema cársico. Para além disso, procuraremos mostrar como esta metodologia, utilizando apenas os valores dos caudais e da precipitação, pode ser uma boa ferramenta no estudo hidrogeológico dos aquíferos cársicos à escala regional. Por último, tentaremos, com base nos resultados obtidos, inferir algumas características internas do maciço de Sicó, particularmente no que se refere ao grau de carsificação e à organização da drenagem subterrânea.

A opção pela aplicação da *time series analysis* justifica-se pelo facto de existir pouca informação hidroquímica da água das exurgências, o que constitui, por si só, uma excelente fonte de informação e

---

<sup>1</sup> Neste trabalho decidimos manter em inglês uma grande parte da terminologia específica da análise estatística e da respectiva aplicação à hidrologia, facto que se justifica pela universalidade deste idioma e por facilitar ao leitor a comparação com os estudos referidos no texto.

um método bastante fidedigno no conhecimento da dinâmica hidrológica nos aquíferos cársicos (Alves, 1995). Por outro lado, esta escolha apoia-se na vasta bibliografia internacional onde se prova, mediante o estudo de numerosas nascentes, principalmente na Europa, que esta metodologia é particularmente útil no estudo dos ambientes cársicos, dada a facilidade na recolha de dados e o facto de trazerem importantes e fiáveis informações no estudo dos aquíferos cársicos à escala regional (Labat *et al.*, 2000; Larocque *et al.*, 1998; Kovacic, 2010).

A correlação e a análise espectral baseiam-se numa aproximação que relaciona o *output* com o *input* do sistema através de um conjunto de funções estatísticas. O aquífero é, assim, entendido como um filtro que transforma o sinal de entrada num sinal de saída, sendo que as características dessa transformação constituem uma preciosa fonte de informação acerca da circulação hipogea do maciço e, conseqüentemente, da sua própria estrutura interna. Apresentando-se como um método de grande simplicidade, utilizando apenas os dados dos caudais das exsurgências e da precipitação, a análise das séries temporais aporta, no entanto, valiosas informações acerca da hidrodinâmica do aquífero como sejam a diferença temporal entre o *input* e o *output*, a porosidade do aquífero, a variabilidade espacial e temporal na recarga e na descarga, os limites do aquífero, a forma e a velocidade de circulação da água, a capacidade de armazenamento de água.

A aplicação deste método às duas principais exsurgências do bordo oeste do Maciço de Sicó (Olhos d'Água do Anços e Ourão) mais do que salientar as diferenças entre o regime de caudais<sup>2</sup> e, conseqüentemente, inferir as características físicas da área de recarga de cada uma delas, possibilitou um primeiro conhecimento sobre a dinâmica do conjunto do maciço, amplamente desconhecida até agora. Apenas Cunha (1986) no seu trabalho sobre as serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere esboçou um esquema de circulação hipogea deste maciço, que apelidou de “provisório”, dada a inexistência de séries de dados hidrométricos e climatológicos que lhe permitissem aprofundar a análise. Esse esquema constituiu a base do presente trabalho, designadamente na instalação dos aparelhos de registo de dados climatológicos (pluviómetros digitais) na área de recarga e de dados hidrométricos (sonda de nível) nos dois principais exutórios do sistema no bordo oeste.

## 2. Caracterização da área de estudo

O maciço de Sicó localiza-se na região centro-litoral de Portugal e constitui um dos mais importantes sistemas cársicos da Orla Meso-Cenozoica ocidental. Em termos hidrogeológicos, o maciço corresponde ao sector centro-norte do aquífero cársico Sicó-Alvaiázere. Trata-se de um sistema com funcionamento

---

<sup>2</sup> A nascente do Ourão, apesar de estar representada nos gráficos que mostram os resultados obtidos, apenas será considerada na análise univariada e na correlação cruzada, uma vez que as outras funções da análise espectral reflectiam em demasia a forma lagunar da nascente, a montante da sonda de registo. Assim, o estudo da relação *input-output* ficaria comprometido, dado que os resultados não reflectiriam a estrutura de drenagem interna do maciço, mas antes da forma da nascente, dado os caudais estarem ‘regularizados’ na medição à saída da nascente. No entanto, decidimos manter a sua representação, já que permite confirmar os resultados e a tendência revelados pela análise do caudal dos OAA no estudo da hidrodinâmica subterrânea do maciço de Sicó.

tipicamente cársico, de circulação hipogea que se desenvolve ao longo de uma rede de drenagem criptorreica ainda relativamente desconhecida, particularmente no que se refere ao seu grau de desenvolvimento (dimensão e extensão das condutas, conexão e organização da rede). A descarga do sistema faz-se predominantemente para oeste, ao longo de um conjunto de nascentes que se estendem, longitudinalmente, ao longo do vale do rio Anços, sendo as principais saídas, as exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão. Estas nascentes surgem, assim, na bordadura ocidental do maciço, condicionadas pela existência de fracturação meridiana, que ajuda a explicar o alinhamento deste conjunto de nascentes e do próprio vale do rio Anços (Figura 1a). A sua localização está relacionada com questões estruturais, mas parece indicar uma inclinação do tecto das zonas hidrológicas subterrâneas para oeste, acompanhando o pendor das camadas (por si só orientador do escoamento), o que parece atestado pela diferença altimétrica e de caudal entre as exsurgências do bordo leste (Legação, Alcamouque e Alvorge, posicionadas a cotas entre os 225 e os 310m e todas de carácter temporário) e as do bordo oeste (situadas a cotas entre os 40 e os 110 m, algumas perenes). Segundo Cunha (1988) as exsurgências da bordadura ocidental do maciço serão responsáveis pela drenagem de mais de metade das águas que circulam no interior dos calcários do Dogger.

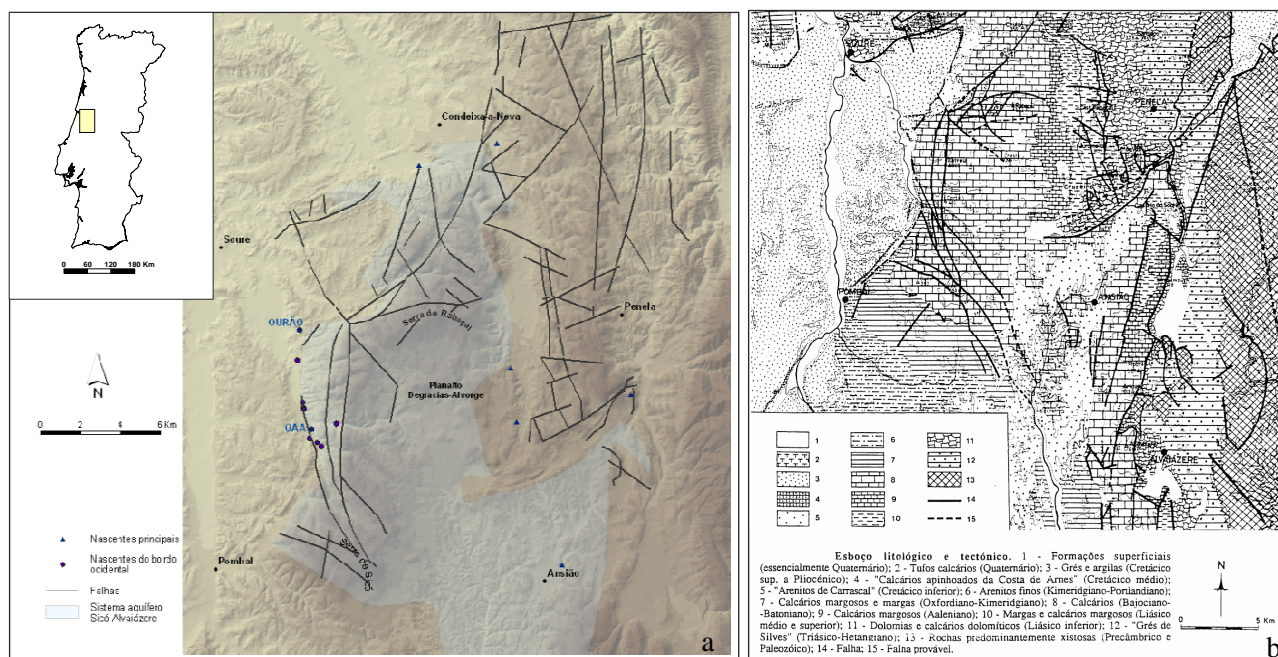


Figura 1 – As nascentes da bordadura ocidental do maciço de Sicó no contexto do aquífero Sicó-Alvaiázere, da hipsometria e da tectónica regionais (a); esboço litológico e tectónico – Cunha, 1988 (b)

O sistema aquífero cársico desenvolve-se em calcários puros do Jurássico médio (Bajoniano e, principalmente, Batoniano), enquadrados na base por rochas do Aaleniano (mais margosas e, portanto, de permeabilidade muito reduzida) – Figura 1b. A estrutura e, particularmente, as deformações tectónicas parecem ser determinantes nos padrões de circulação hipogea desta área, merecendo particular destaque

o anticlinal do Rabaçal que, devido ao seu núcleo margoso constitui uma importante barreira à circulação subterrânea da água, obriga a uma compartimentação da área em 2 sub-bacias hidrogeológicas: a maior, de localização meridional, é constituída pela Serra do Sicó e pelo Planalto Degracias-Alvorge e drena principalmente para os Olhos d'Água do Anços e uma outra sub-bacia setentrional, bastante mais pequena que drena para o Ourão. No seu conjunto, o sistema cársico das nascentes do vale do rio Anços ocupa uma área de, aproximadamente, 100 Km<sup>2</sup>, sendo o ponto mais elevado o topo da serra de Sicó (558 m), e as altitudes mais frequentes da ordem dos 300-400 m (Planalto de Degracias-Alvorge). A precipitação registada nesta área planáltica, correspondente à área de recarga é de, aproximadamente, 1200 mm/ano (estação de Degracias, 1979/80 – 2006/07). A estação da Sra. da Estrela (precipitação utilizada neste trabalho) registou para os últimos dois anos hidrológicos valores muito semelhantes.

O caudal médio anual, no período de 1999 a 2008, foi de 1,3 m<sup>3</sup>/s nos Olhos d'Água do Ourão e de 0,6 m<sup>3</sup>/s no Ourão, com o caudal máximo instantâneo a ser, respectivamente, de 8,1 m<sup>3</sup>/s e de 3,5 m<sup>3</sup>/s e o caudal mínimo instantâneo de 0,05 m<sup>3</sup>/s em ambas as exurgências<sup>3</sup>. A justificação para o caudal dessas duas surgências ser tão diferente, principalmente em águas altas, reside na disparidade da respectiva área de recarga. No conjunto dos 2 anos hidrológicos estudados, o caudal médio mensal máximo nos Olhos d'Água do Anços ocorreu em Janeiro (3,5 m<sup>3</sup>/s), com um pico secundário bem definido em Março (3,2 m<sup>3</sup>/s) e o mínimo em Outubro (0,2 m<sup>3</sup>/s), o que constitui, no primeiro caso, um atraso de 1 mês relativamente à precipitação mensal máxima (Dezembro) e ao pico secundário (Fevereiro) e de 3 meses em relação ao mínimo mensal de precipitação (Julho). Os hidrogramas representativos do caudal médio diário e do caudal médio mensal são apresentados na Figura 2.

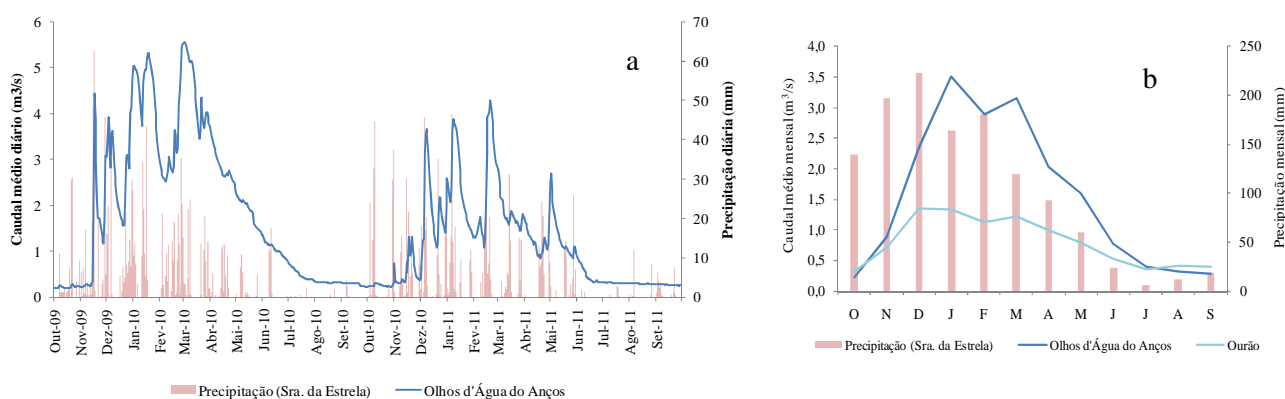


Figura 2 – Hidrogramas referentes ao caudal médio diário dos OAA e à precipitação diária na estação da Sra. da Estrela (a) e ao caudal médio mensal nos OAA e no Ourão e precipitação mensal (b)

<sup>3</sup> Pelo facto de estes valores corresponderem a medições pontuais do caudal com molinete e micro-molinete e de a série ser bastante curta, não é possível ir além da simples referência a valores isolados.

### 3. Metodologia

Este trabalho focou-se na análise estatística (univariada e bivariada) das séries de dados relativos ao caudal de duas nascentes (OAA e Ourão) e à precipitação registada na área de recarga do aquífero ao longo de 2 anos hidrológicos (2009/2010 - 2010/2011). Os valores de *input* utilizados referem-se ao total de precipitação acumulada num dia, sem se retirar o valor da evapotranspiração, à semelhança do que foi feito por Pullido-Bosch *et al.* (1987) para as surgências de El Torcal e Simat (SE de Espanha) e por vários outros autores ao longo das últimas décadas, tal como escreve Petric (2002). Esta autora tem, aliás, comparando as diferenças entre a utilização da precipitação registada numa estação e a infiltração efectiva (Petric, 2002; Jemcov e Petric, 2009), e concluiu que podem existir algumas diferenças quantitativas, mas que, comparativamente a outros factores que influenciam a relação *input-output*, essa diferença não é significativa nesta escala de análise.

A análise univariada permite conhecer a estrutura individual de uma série de dados no domínio do ‘tempo’ (auto-correlação) e no domínio da ‘frequência’ (densidade espectral). A análise bivariada caracteriza a transformação de uma função de *input* numa função de *output* e configura o melhor método quando estamos perante uma forte relação entre duas séries, neste caso as séries da precipitação e do caudal. A análise da correlação cruzada (*cross-correlation*) é executada no domínio temporal e a *cross-amplitude, phase, coherence* and *gain* no domínio das frequências. Neste artigo não desenvolveremos as bases teóricas e as expressões matemáticas da *time series analysis* (Box *et al.*, 1994; Padilla e Pulido-Bosch, 1995; Samani, 2001). Enfatizaremos antes a interpretação hidrogeológica das várias funções utilizadas e dos resultados obtidos (Mangin, 1984, Larocque *et al.*, 1998; Mathevet *et al.*, 2004; Panagopoulos e Lambrakis, 2006; Jemcov e Petric, 2009; Kovacic, 2010).

#### Análise univariada

A autocorrelação mostra a dependência dos acontecimentos entre si para intervalos de tempo sucessivamente maiores, traduzindo, por isso a memória do sistema. Com efeito, quanto mais um acontecimento, num dado instante, tiver uma influência a longo prazo, mais lento será o decréscimo da autocorrelação. A referida ‘memória do sistema’ (tempo que o sistema leva até “esquecer” as suas condições iniciais) é quantificada através do tempo que a autocorrelação leva a atingir um determinado valor predefinido (normalmente 0.2 ou 0.1). Esse intervalo é designado por *decorrelation lag time*.

Do ponto de vista hidrogeológico, a forma do correlograma (gráfico onde é representada a autocorrelação) fornece, indirectamente, informações sobre o grau de carsificação do sistema bem como informação sobre a sua capacidade de armazenamento (Mangin, 1984, 1994). De acordo com numerosos autores, já anteriormente citados, o lento decréscimo da autocorrelação (até ao valor de 0.2) durante um longo período de tempo está associado a uma elevada memória do sistema, relacionada com um sistema pouco carsificado, com grandes reservas subterrâneas ou a um sistema em que a drenagem subterrânea se processa lentamente. Contrariamente, a rápida descida do correlograma e um curto *decorrelation lag time* correspondem a um sistema com baixa memória. São característicos de um sistema cársico bem

desenvolvido, com largas condutas e com poucas reservas subterrâneas, ou seja, um sistema bastante carsificado com uma estrutura interna bem drenante (Mangin, 1994). A densidade espectral é igualmente utilizada nesta abordagem e corresponde à mudança do modo 'tempo' para o domínio da 'frequência' através da transformada de Fourier (Larocque *et al.*, 1998). Elevados valores de densidade em baixas frequências são interpretados como indicadores de um sistema com grande inércia e um notável efeito de regulação.

#### Análise bivariada

A correlação cruzada (*cross-correlation*) estabelece a relação *input-output*, o que implica a transformação do sinal de *input* (precipitação, infiltração directa nos sumidouros) num sinal de *output* (caudal das exurgências), permitindo inferir o grau de carsificação do sistema e, constituindo, por isso, uma excelente ferramenta no estudo dos aquíferos cársicos entendidos como uma *black box*. Do ponto de vista da sua aplicação à hidrogeologia cársica, considera-se que o atraso (tempo que decorre entre o valor zero e o valor máximo) indica o grau de carsificação do sistema e fornece uma estimativa do tempo de transferência do impulso de resposta (*pressure pulse transfer time*) e do tempo que uma partícula leva a atravessar o aquífero (Panagopoulos e Lambrakis, 2006). Partindo desta premissa, os resultados obtidos nesta análise permitem a classificação dos sistemas cársicos em dois grupos distintos: por um lado os que apresentam uma descida lenta do gráfico, correspondendo a tempos de resposta que atingem os 100 dias e a atrasos médios de várias semanas. Trata-se, neste caso, de sistemas com drenagem lenta, com um enchimento demorado do aquífero e com uma importante capacidade de armazenamento de água, permitindo, assim, a filtragem do sinal de *input* ao atravessar o aquífero. Por outro lado, sistemas cársicos bem desenvolvidos são caracterizados por tempos de resposta muito mais curtos, correspondendo a um ténue controlo exercido pelo sistema sobre o *input*.

A amplitude cruzada (*cross-amplitude*) pode ser associada à duração do impulso de resposta e indica a filtragem de componentes temporais dos dados pluviométricos (*input*). Assim, sistemas cársicos pouco desenvolvidos podem ser considerados poderosos filtros que atenuam principalmente sinais de *input* de curta duração (elevadas frequências) em detrimento dos sinais de longa duração (por exemplo variações sazonais) que são claramente realçados (baixas frequências). Assim, a existência de um grande pico em frequências muito baixas indica claramente a existência de um ciclo anual, dado que os *inputs* de curta duração são bem filtrados (ou seja, muito atenuados) pelo sistema cársico, não se notando a sua influência no caudal das nascentes, no qual predomina claramente o escoamento de base. Em contrapartida, os sistemas cársicos com uma rede endocársica bastante desenvolvida e bem organizada comportam-se como um filtro ténue, com um fraco efeito de regulação, já que os sinais de *input* (principalmente os de curta duração) são claramente detectados no caudal das surgências. Apresentam valores elevados nas baixas frequências, mas que, ao contrário do anterior, decresce lentamente nas médias e altas frequências, nunca atingindo o zero, o que evidencia um sistema cársico

hidrogeologicamente bem desenvolvido, com o predomínio do escoamento directo e um efeito de regulação relativamente fraco (Jemcov e Petric, 2009).

A *coherence function* mostra a linearidade de um sistema cársico, ou seja, se uma variação na função de *input* gera uma alteração proporcional na função de *output*. Se esta situação se verificar, estamos perante um sistema com grande linearidade, característica de aquíferos muito carsificados, nos quais uma intensa chuva origina uma forte subida do caudal das exurgências num curto período de tempo (Panagopoulos e Lambrakis, 2006). A *gain function* expressa a amplificação (>1) ou atenuação (<1) nos dados de *output* relativamente aos dados de *input*, exercidas pelo sistema cársico (Padilla e Pulido-Bosch, 1995). Num ambiente cársico, este fenómeno estará relacionado com o armazenamento de água durante o período de águas altas e a sua libertação no período seco (Larocque *et al.*, 1998). A amplificação do sinal de *output* deriva, por isso, do fornecimento de água armazenada no sistema, pelo que esta função pode fornecer informação sobre a capacidade de armazenamento de água no sistema e, conseqüentemente, do seu grau de carsificação. Assim, e segundo as simulações de exemplos teóricos realizadas por Padilla e Pulido-Bosh (1995), um sistema pouco carsificado filtra e atenua fortemente o sinal de *input* nas altas frequências (episódios pluviométricos de curta duração) e amplifica o sinal nas baixas frequências (influência anual). Finalmente, a *phase function* mostra o atraso, para diferentes frequências, entre a precipitação e o caudal (Padilla e Pulido-Bosch, 1995). É complementar à análise da correlação cruzada.

#### 4. Resultados e discussão

##### Análise univariada

A autocorrelação da precipitação diária da estação da Senhora da Estrela decresce rapidamente, atingindo o nível de confiança (0.2) quase imediatamente, podendo, por isso, considerar-se como uma função puramente aleatória (*white noise*). No que se refere aos Olhos d'Água do Anços, o decréscimo da autocorrelação não é regular, notando-se dois comportamentos. O primeiro caracteriza-se por uma descida inicial mais acentuada (em 6 dias) e o segundo por uma descida bastante mais lenta, atingindo o valor 0.2 apenas aos 77 dias (Figura 3). Parece, por isso, tratar-se de um aquífero com um comportamento dual: a primeira descida corresponderá à influência das condutas subterrâneas existentes na zona vadosa, que drenam rapidamente e a segunda descida, bastante mais lenta, estará relacionada com características do sistema cársico (grandes galerias na zona saturada que permitem o armazenamento da água que, depois, vai sendo libertada lentamente) e com a existência de depósitos gresosos superficiais na área de recarga que filtram e transmitem lentamente a água entrada no sistema.

Este valor muito elevado do 'efeito de memória' (77 dias) do aquífero que drena para os Olhos d'Água do Anços, evidencia um sistema com uma larga capacidade de armazenamento de água, tratando-se, de acordo com a literatura, de um sistema pouco carsificado ou, sendo carsificado, possui um sistema ineficaz de drenagem subterrânea. No mesmo sentido, Mangin (1994) apresenta valores de 70 dias para



El Torcal; Larocque *et al.* (1998) mostram atrasos de 76 e 73 dias para Leche e Folpougne, respectivamente; Jemcov e Petric (2009) referem valores de 77 dias para Nemanja e Angelini (1997) de 89 e 101 dias respectivamente para Scirca e Bagnara. Os autores são unânimes em afirmar que se trata de sistemas com grande capacidade de armazenamento de água, pouco carsificados ou pouco funcionais na drenagem subterrânea, onde a água circula por uma rede de fissuras que não contribui directamente para o escoamento da nascente durante o período de águas altas, mas que retêm a água, que posteriormente sai gradualmente das fracturas, quando não estiverem saturadas (escoamento de base).

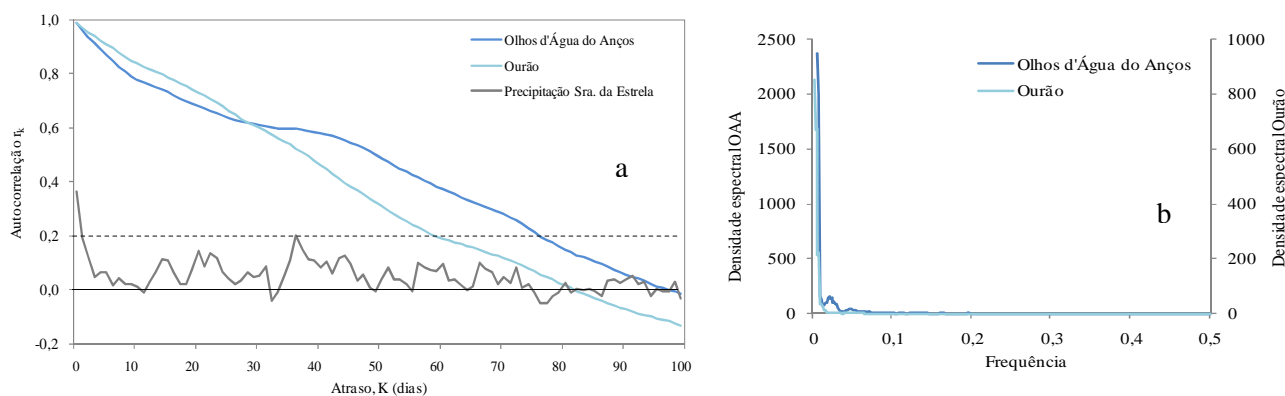


Figura 3 – Representação da autocorrelação (a) e da análise espectral (b) da série de caudais médios diários das exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão

A exsurgência do Ourão apresenta um decréscimo lento e homogéneo da autocorrelação, com um efeito de memória elevado (60 dias), evidenciando, portanto, características físicas que se assemelham bastante aos Olhos d'Água do Anços, particularmente no que se refere à grande capacidade de armazenamento de água.

A densidade espectral do caudal diário dos Olhos d'Água do Anços apresenta um pico na frequência 0,0027 (364 dias) o que confirma a presença de um importante ciclo anual. A Figura 3 mostra apenas alguns pequenos picos em frequências bastante baixas, inferiores a 0,023 (cerca de 43 dias), o que evidencia um sistema com grande capacidade de filtragem (principalmente de sinais de *input* curtos) e alguma inércia, revelando tratar-se de um aquífero com pequena componente de escoamento directo no conjunto do caudal da nascente ao contrário do escoamento de base, que predomina largamente. A capacidade de filtragem pode concluir-se através da frequência de cut-off (densidade espectral  $<1$ ) que é de 5 dias, o que significa que todos os eventos pluviosos de duração inferior a 5 dias são filtrados pelo sistema (Mathevet *et al.* 2004).

### Análise bivariada

A análise bivariada relaciona o caudal das nascentes com a precipitação entrada no sistema, permitindo ver o atraso entre o *input* e o *output* e, conseqüentemente, estimar a capacidade de filtragem e

atenuação do sinal de *input* pelo sistema, inferindo, desta forma, características físicas desse mesmo sistema cársico.

A correlação cruzada (*cross-correlation function - CCF*) mostra uma clara dissimetria a favor dos valores positivos de  $K$ , indicando que a precipitação influencia a quantidade de água que sai nas exsurgências. A forma do gráfico (Figura 4) mostra o comportamento dual do sistema cársico de Sicó, já referido na autocorrelação. O pico do gráfico, correspondendo a 3 dias de atraso nos Olhos d'Água do Anços, expressa claramente a rápida resposta do aquífero ao episódio pluvioso (escoamento directo), evidenciando a existência de uma já mencionada rede organizada de condutas subterrâneas que rapidamente encaminha parte da precipitação caída até ao exutório. O mesmo ocorre no Ourão, embora com menor rapidez (5 dias de atraso) e sem um pico tão exuberante, o que se explica pela forma da exsurgência (ver nota de rodapé 1). Estes valores de pico máximo da CCF revelam que parte do sistema aquífero dos Olhos d'Água do Anços está bastante carsificado, dado que os picos máximos para sistemas considerados fortemente carsificados são próximos dos encontrados neste estudo. Refira-se, por exemplo, o caso da nascente de Simat (Padilla e Pulido-Bosch, 1995) com 2 dias; da nascente de Vipava (Jemcov e Petric, 2009) com 5 dias e da nascente de Almyros (Panagopoulos e Lambrakis, 2006) com 4 dias.

A amplitude cruzada (*cross-amplitude function - CAF*) mostra que o sistema filtra e atenua o sinal de *input* nas médias e altas frequências em detrimento das baixas frequências, onde se encontra o pico máximo, o que mostra a presença de um importante ciclo anual no sinal de *input* em detrimento de curtos episódios pluviométricos que são filtrados pelo sistema cársico, não tendo repercussão no caudal das exsurgências. Este ciclo anual pode ser explicado pelo ciclo anual de recarga do aquífero. Deste modo, o caudal das exsurgências reflecte muito mais a alimentação em cada ano hidrológico ao longo dos meses húmidos do que episódios isolados de precipitação, pelo que predomina indiscutivelmente o caudal de base em detrimento do escoamento directo. Adicionalmente, a existência de um pico em frequências correspondentes a um período de 56 a 60 dias indica uma demorada resposta das exsurgências ao *input*.

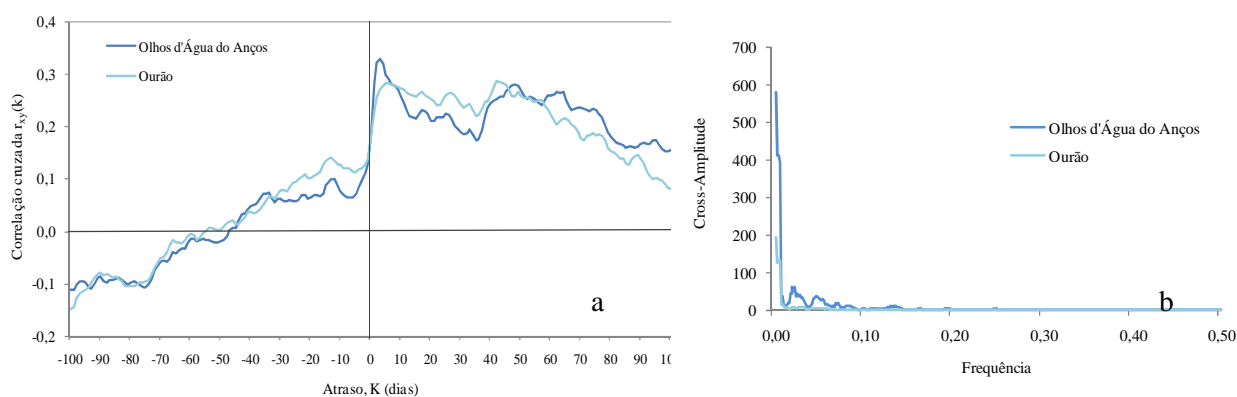


Figura 4 – Representação da correlação cruzada (a) e da amplitude cruzada (b) dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão

Contudo, a larga banda espectral dos caudais (apenas para frequências acima de 0.39 o gráfico se aproxima definitivamente de valores próximos de 0) mostra a existência de uma importante componente de escoamento rápido no total do caudal de surgências, num período até 2,6 dias. Acresce ainda o facto de os valores da CAF nunca serem nulos (mesmo nas altas frequências), o que revela a presença de *quickflow* ao longo de vários dias, ou seja, variações na precipitação continuam a ter resposta no caudal das nascentes, apesar de muito filtradas e atenuadas.

A *coherence function* (COF) mostra uma relação não-linear entre a precipitação e o caudal das nascentes, ou seja, a existência de variações nos valores de precipitação não significa uma variação proporcional no caudal das nascentes. O valor médio de 0.54 para os Olhos d'Água do Anços (bastante distante da linearidade) resulta de uma considerável filtragem e atenuação do sinal de *input* na sua passagem através do aquífero - Figura 5. Esta característica do aquífero é reforçada através da *gain function* (GAF), onde se vê uma fortíssima atenuação e filtragem do sinal de *input* nas médias e altas frequências e uma elevada transformação nas baixas frequências, revelando, deste modo, ser um sistema com uma rede de drenagem hipogea pouco funcional. A *phase function* (PHF) mostra um alinhamento consistente para frequências até 0.09. A partir daí, e particularmente nas altas frequências, o sinal torna-se muito atenuado, distorcido e incoerente, não sendo possível calcular o atraso, o que se deve à quase inexistência de escoamento rápido, dada a excessiva atenuação do sinal de *input* por parte do sistema cársico (Padilla e Pulido-Bosch, 1995; Panagopoulos e Lambrakis, 2006). O atraso médio entre o *input* e o *output* para frequências baixas (até 0.09) é de 9,3 dias.

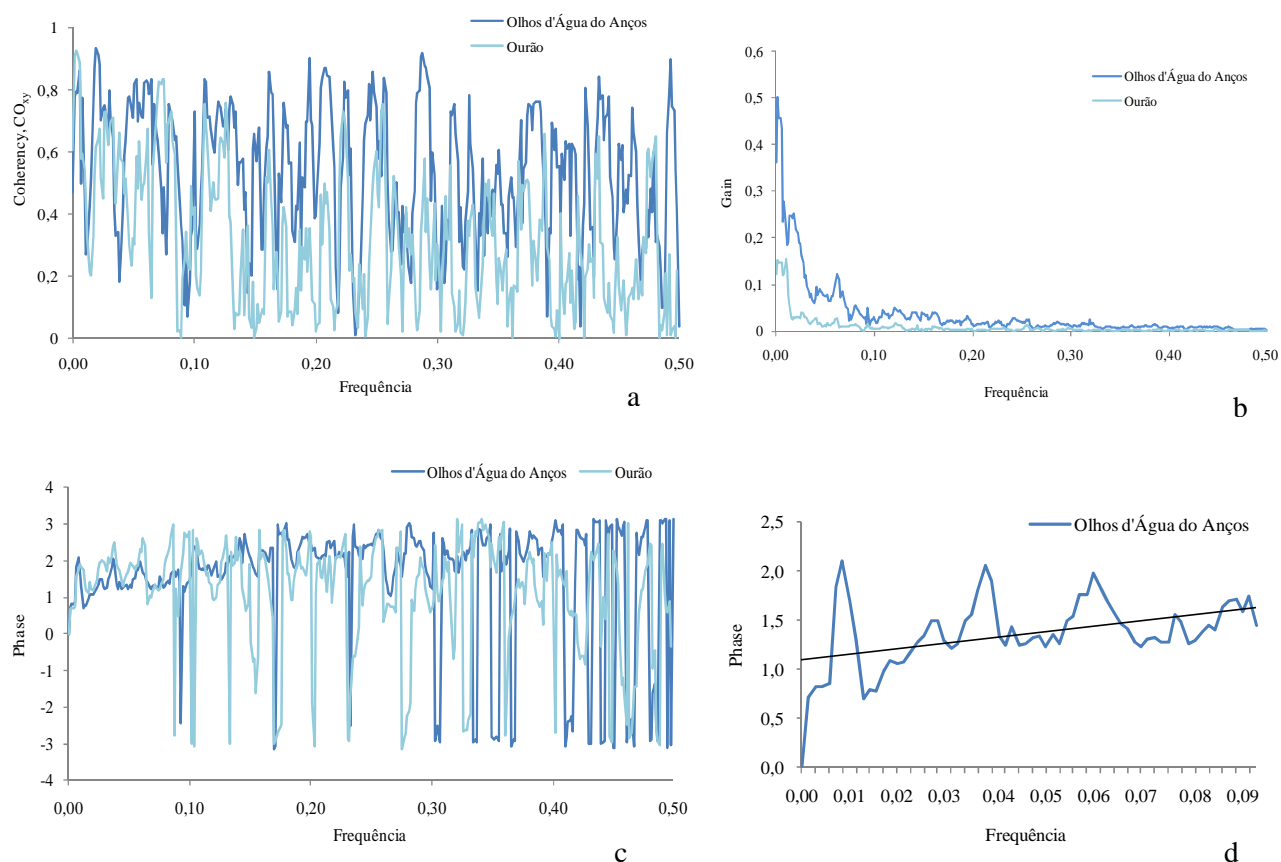


Figura 5 – Representação da *coherence* (a), *gain* (b) e *phase* (c, d) functions dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão

## 5. Conclusões

Este trabalho constitui uma primeira abordagem no conhecimento da hidrodinâmica hipogea do maciço cársico de Sicó, tomando por base a precipitação registada na área de recarga (Planalto Degraças-Alvorge) e o caudal médio diário das duas principais nascentes do bordo oeste do maciço (Olhos d'Água do Anços e Ourão), para onde drena grande parte deste aquífero. A hidrocirculação é favorecida pela estrutura (falhas que funcionam como caminhos preferenciais de encaminhamento da água para as exurgências) e pelo pendor das camadas, maioritariamente para oeste. Tratando-se de um sistema com pouca heterogeneidade espacial (grande homogeneidade litológica devido à grande extensão de calcários do Dogger) e com uma recarga puramente autógena (sem aportes exteriores à área cársica), este método, na sequência dos resultados obtidos, mostrou ser bastante útil particularmente no conhecimento interno dos sistemas cársicos que, indirectamente, permite inferir.

A autocorrelação das séries de caudal revelou um sistema com longo 'efeito memória' - 77 dias para os Olhos d'Água do Anços e 60 dias para o Ourão, o que permite perceber, desde logo, tratar-se de um sistema com grande capacidade de armazenamento de água e com uma drenagem subterrânea pouco

funcional. Essa enorme capacidade de armazenamento justificar-se-á não por se tratar de um sistema pouco carsificado, mas sim pela existência de uma zona saturada profunda e com grandes galerias. O predomínio do escoamento de base, deduzido pelo lento declínio do correlograma é reforçado pela densidade espectral que apresenta um elevado pico em frequências muito baixas (inferiores a 0.02), revelando um importante ciclo anual e uma importante capacidade de filtragem, particularmente de *inputs* de curta duração (altas frequências). Esta capacidade de atenuar e filtrar os episódios pluviométricos relaciona-se com a existência, no sector leste do Planalto de Degraças-Alvorge (área de recarga), de extensos depósitos gresosos e de um epicarso que se comporta como um filtro lento.

A correlação cruzada, ao calcular o atraso entre o *input* e o *output* revelou um sistema cársico com um comportamento dual: por um lado, um sistema com grande capacidade de armazenamento de água e filtragem dos *inputs* de curta duração (apenas alguns dias), onde predomina o escoamento de base. Por outro lado, ao apresentar um atraso de apenas 3 dias entre a precipitação e o caudal nos Olhos d'Água do Anços, mostrou que, parte do maciço de Sicó estará bastante carsificado, apresentando uma eficaz rede subterrânea de condutas, ideia reforçada pelo facto da entrada de água no sistema ser difusa e não concentrada (tipo de recarga onde surgem os menores atrasos *input-output*). A presença de uma componente de escoamento directo (*quickflow*) predominante no caudal dos Olhos d'Água do Anços, principalmente nos dias imediatamente após o sinal de *input* (até 2,6 dias), é realçada na amplitude cruzada que mostra que o escoamento directo se mantém ainda por algum tempo como parte do caudal total da nascente, uma vez que os seus valores nunca são nulos, mesmo nas altas frequências. Esta conclusão poderá justificar-se pela grande espessa zona vadosa, que mesmo apresentando uma rede de condutas bem organizada, leva alguns dias a ser atravessada pela água entrada no sistema.

Os resultados obtidos nas restantes funções da análise espectral (*coherence*, *gain* e *phase*) confirmam tratar-se, sobretudo, de um sistema não-linear (COF de 0.54), onde variações na precipitação não determinam proporcional variação no caudal da exurgência, dado que o sistema possui uma grande capacidade de filtragem e atenuação do sinal de *input*, principalmente nas médias e altas frequências. A *phase function* evidencia claramente esta situação, uma vez que a partir da frequência 0.09, o sinal de *input* é de tal forma atenuado e distorcido que não é possível calcular o atraso médio.

Tendo em atenção os resultados obtidos e as características hidrogeológicas inferidas, podemos concluir que o sistema aquífero cársico em estudo apresenta um comportamento dual, com uma resposta muito rápida dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão à entrada de água no sistema (apresentando um atraso de apenas 2 a 3 dias entre o *input* e o *output*), com uma componente importante de escoamento rápido até 2,6 dias após o *input*, mas com o predomínio claro do escoamento de base. Este escoamento resulta da relativa inércia do sistema (que filtra e atenua o sinal de *input*, e da grande capacidade de armazenamento de água, a qual retém para, posteriormente, libertar de forma progressiva). De realçar também a importância da recarga difusa que decorre da planura da área de recarga do aquífero e dos depósitos gresosos da parte leste do maciço, que actuam como um imponente filtro da água entrada no

sistema. Estas características físicas explicam porque, mesmo em anos muito secos, as exsurgências dos Olhos d'Água do Anços e do Ourão continuam a apresentar caudal.

## Agradecimentos

Este trabalho só foi possível devido à prestimosa colaboração da Administração de Região Hidrográfica do Centro (ARH Centro), do Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT) e da Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo fornecimento de dados e pelo financiamento para a aquisição de vários equipamentos digitais de recolha continuada de dados.

## 6. Referências bibliográficas

- Angelini, P. (1997) – Correlation and spectral analysis of two hydrogeological systems in central Italy, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42(3)
- Alves, J. A. (1995) – *Dinâmica cársica e implicações ambientais nas depressões de Alvalade e Minde*, Dissertação de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa
- Box, G.E.P.; Jenkins, G.M.; Reinsel, G.C. (1994) – *Time series analysis: forecasting and control*, 3ª ed., Prentice Hall Inc., NJ, USA
- Cunha, L. (1988) – *As serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere*, Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra
- El-Hakim, M. e Bakalowicz, M. (2007) – Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in Middle East. Implications on karst aquifers classification, *Journal of Hydrology*, 333, 329-339
- Jemcov, I. e Petric, M. (2009) – Measured precipitation vs. effective infiltration and their influence on the assessment of karst system based on results of time series analysis, *Journal of Hydrology*, 379, 304-314
- Kovacic, G. (2010) – Hydrogeological study of the Malencica karst spring (SW Slovenia) by means of a time series analysis, *Acta Carsologica*, 39/2, 201-215
- Kovacic, G. e Petric, M. (2010) – Contribution of time series analysis to the study of the Malencica karst spring, Slovenia. In Bonacci, O. (Ed) - *Sustainability of the karst environment. Dinaric karst and other karst regions*, Proceedings of the International interdisciplinary scientific conference, Croacia
- Labat, D.; Ababou, R. E Mangin, A. (2000) – Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analysis, *Journal of Hydrology*, 238, 123-148
- Larocque, M.; Mangin, A.; Razack, M. E Banton, O. (1998) – Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *Journal of Hydrology*, 205, 217-231
- Mangin, A. (1975) – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, *Annales de Spéléologie*, 30 (1), 21-124
- Mangin, A. (1984) – Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, *Journal of Hydrology*, 67, 25-43
- Mangin, A. (1994) – Karst hydrogeology. In Gilbert, J.; Danielopol, D.L. e Stanford, J.A (Eds) – *Groundwater ecology*. Academic Press, pp. 43-67
- Marsaud, B. (1997) – *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*, Tese de doutoramento, BGRM, 268, Paris
- Mathevet, T.; Lepiller, M. e Mangin, A. (2004) – Application of time series analysis to the hydrological functioning of an alpine karstic system: the case of Bang-L'Eau-Mort, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1051-1064
- Morales-Juberias, T.; Cruz-Sanjulian, J.J.; Zafra, P.; Olazar, M. e Arandes, J.M. (1996) – Etudes des réponses naturelles du système karstique d'Olalde (Pays Basque): Approche de la reconnaissance de sa structure interne, *Hydrogéologie*, 1, 39-51
- Padilla, A. e Pulido-Bosch, A. (1995) – Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Journal of Hydrology*, 168, 73-79
- Panagopoulos, G. e Lambrakis, N. (2006) – The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of karst systems: application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete), *Journal of Hydrology*, 329, 368-376
- Petric, M. (2002) – *Characteristics of recharge – discharge relations in karst aquifer*, Karst Research Institute, Postojna, Slovenia
- Pullido-Bosch, A.; de Marsily, G. e Benavente, J. (1987) – Análisis de la descarga del Torcal de Antequera mediante deconvolución, *Hidrogeologia*, 2, 17-28

- Pulido-Bosh, A.; Padilla, A.; Dimitrov, D. e Machkova, M. (1995) – The discharge of some karst springs in Bulgaria studied by time series analysis, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 40(4)
- Rahnemai, M.; Zare, M., Nematollahi, A.R. e Sedghi, H. (2005) – Application of spectral analysis of daily water level and spring discharge hydrographs data comparing physical characteristics of karstic aquifers, *Journal of Hydrology*, 311, 106-116
- Samani, N. (2001) – Response of karst aquifers to rainfall and evaporation, Maharlou, Iran, *Journal of Cave and Karst Studies*, 61(1), 33-40