

## **Análisis de ciclicidades de series hidrogeológicas en el estudio de los procesos de recarga**

**Luque Espinar, J.A.<sup>1</sup>; Pardo Igúzquiza, E.<sup>2</sup> y Chica Olmo, M.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, 4 bajo. Edificio Zulema. 18006 Granada.  
E-mail: ja.luque@igme.es

<sup>2</sup> Universidad de Granada/CEAMA. Dto. Geodinámica. Avda. de Fuente Nueva s/n. 18074 Granada.  
E-mail: mchica@ugr.es

### **RESUMEN**

*Se presentan los resultados del análisis espectral de series piezométricas, foronómicas, y termoplumiométricas relacionadas con el acuífero de la Vega de Granada. Las series estudiadas abarcan un periodo comprendido entre 30 años, en buena parte de las series, hasta los 50 años en los registros termoplumiométricos. El análisis mediante el método de Blackman-Tukey ha permitido detectar en las series de datos hidrogeológicos la presencia de al menos cinco ciclos. Los resultados obtenidos han permitido establecer hipótesis relacionadas con el funcionamiento del acuífero, fundamentalmente con los procesos de recarga del mismo.*

*Palabras clave: análisis espectral, clima, ENSO, NAO, recarga, series hidrogeológicas.*

### **INTRODUCCIÓN**

La disponibilidad de datos temporales hidrogeológicos permite abordar estudios diversos de los acuíferos tales como la relación río-acuífero, los procesos de recarga y descarga, cambios en el comportamiento de la piezometría o, simplemente, los cambios en la calidad de las aguas. Es evidente que el análisis correcto de esta información temporal es una ayuda inestimable para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos explotados.

El análisis espectral es una metodología ampliamente utilizada para el estudio de series temporales. En síntesis, el objetivo de este método es la identificación de patrones que rigen las oscilaciones (ciclicidades) presentes en una serie temporal. Para ello establece un modelo que considera a la serie como una combinación lineal de funciones sinusoidales de periodo conocido pero de amplitud y fase desconocidas. El análisis espectral pretende la estimación de estos parámetros, amplitud y fase, de cada función sinusoidal de la serie analizada. En particular, la amplitud está relacionada con la varianza de los datos de la serie, de modo que ésta puede descomponerse en componentes que equivalen a la parte de la varianza

explicada por cada función sinusoidal. La función que relaciona la varianza explicada con respecto a la frecuencia de los armónicos se conoce como "densidad espectral". Para este trabajo se ha utilizado el método de Blackman-Tukey que permite calcular la densidad espectral a partir de la función covarianza de la serie.

Se han estudiado un número importante de series temporales de piezometría, datos foronómicos y precipitación disponibles en el acuífero estudiado (Vega de Granada), que en algunos casos alcanzan los 30 años de registros e incluso 50 años para la lluvia. Los resultados del análisis espectral han mostrado claramente la presencia de ciclicidades con diferentes periodos (de meses a años) que son interpretables desde el punto de vista de los cambios climatológicos. Igualmente, se ha constatado que existe una correspondencia de estos ciclos en los datos de precipitación con los de piezometría y caudales aforados en ríos, lo que ha servido para profundizar en el conocimiento de los procesos de recarga del acuífero.

## **DATOS EMPLEADOS**

Los datos piezométricos originales proceden de la red de control del Instituto Geológico y Minero de España; los datos foronómicos corresponden a las estaciones de aforos que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir tiene en los ríos que vierten a la Vega de Granada; y, por último, los valores de lluvia y temperatura se han tomado de las estaciones termopluviométricas existentes en la Vega que pertenecen al Instituto Nacional de Meteorología. Así, para la realización de este trabajo se han utilizado datos de piezometría cuyos registros más antiguos empiezan en el año 1968 en buena parte de los casos (Figura 1). Estas observaciones presentan una frecuencia de medida próxima al mes. En conjunto, se dispone de una media de 150 datos por piezómetro, suficientes para este tipo de estudios (Luque-Espinar, 2001; Taylor y Alley, 2001). Por su parte, los datos de aforos en cauces superficiales arrancan del año 1969, por lo que se dispone de hasta 35 años de información (Figuras 2 y 3). En el caso de las lluvias, el registro abarca casi 50 años (Figuras 4 y 5). El registro disponible de la temperatura es más incompleto, aunque algunas series superan los 30 años (Figura 6).

Todas las series empleadas en este trabajo (piezometría, hidrometría, pluviometría y temperatura) han sido sometidas a un proceso de eliminación de errores de transcripción y a una posterior regularización de las series a un paso constante de un mes, mediante la asignación un valor ponderado por la proximidad del dato anterior y posterior, con objeto de poder aplicar los métodos espectrales.

## **ANÁLISIS ESPECTRAL**

La técnica estadística usada para encontrar componentes cíclicos en series temporales se conoce como análisis espectral (Jenkins y Watts, 1968). El objetivo de éste es la identificación de los patrones que rigen las oscilaciones presentes en una serie temporal. Para ello se utiliza un modelo estructural que consiste en considerar a la serie temporal como una combinación lineal de funciones sinusoidales de periodo conocido pero de amplitud y fase desconocidas. Este modelo es conocido como representación armónica. El análisis espectral consiste en estimar la amplitud y la fase de cada onda sinusoidal en la serie temporal analizada. En particular, la amplitud está relacionada con la varianza de la serie temporal de modo que la varianza total se descompone en la varianza explicada por cada una de las ondas sinusoidales existentes. Cuando

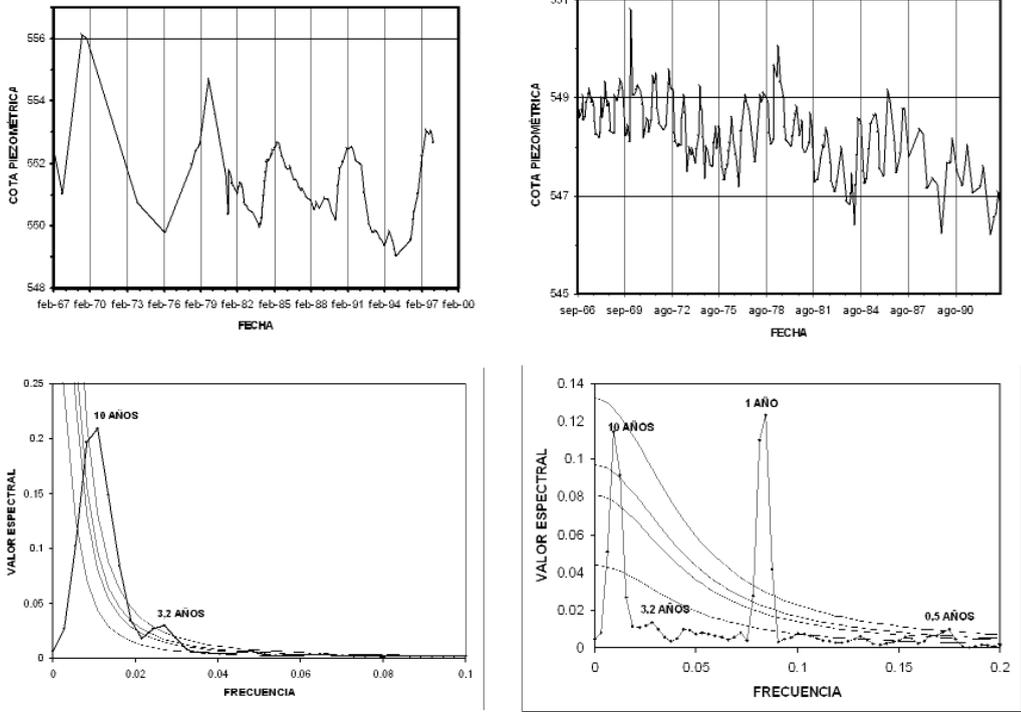


Figura 1. Evolución piezométrica en dos puntos de la Vega de Granada (arriba). Valor espectral correspondiente (abajo). Las líneas que se superponen a los gráficos del valor espectral indican el nivel de significado del pico (90% el inferior y 99% el superior).

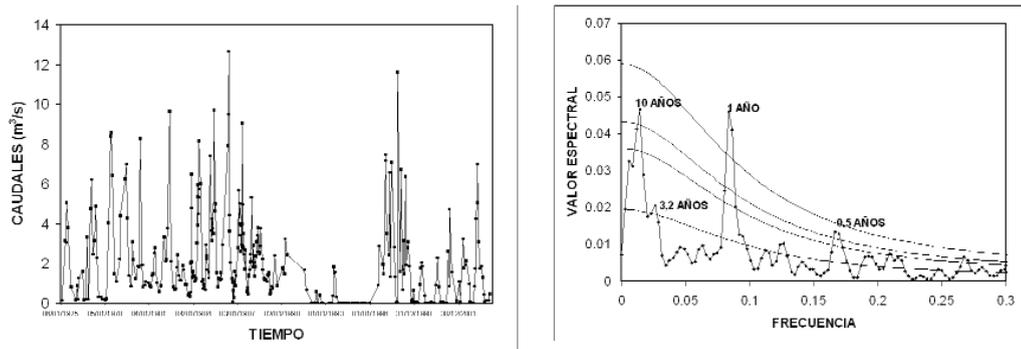


Figura 2. Caudales del río Monachil y su valor espectral.

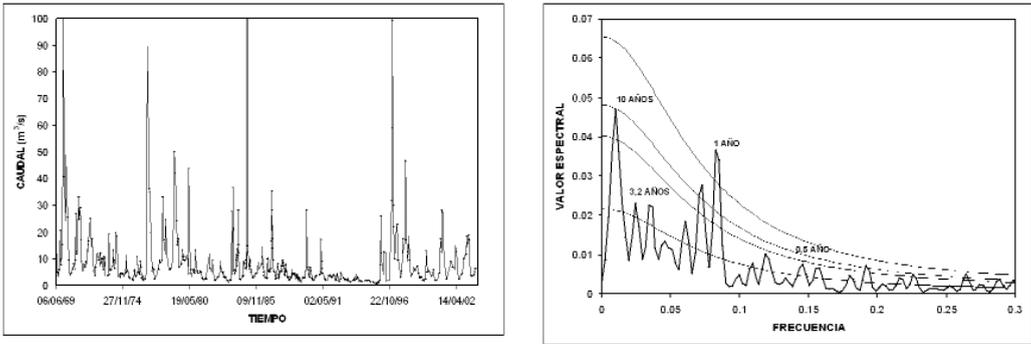


Figura 3. Caudales del río Genil en Tocón y su valor espectral.

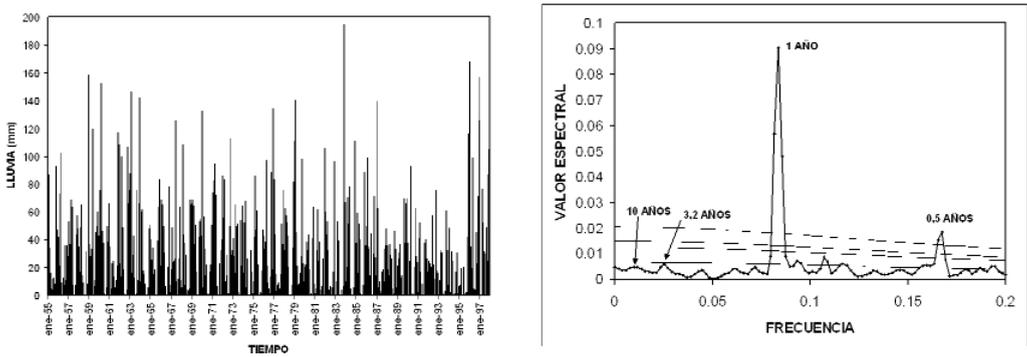


Figura 4. Lluvia caída entre 1954 y 1997 en la Base Aérea de Armilla y sus valores espectrales.

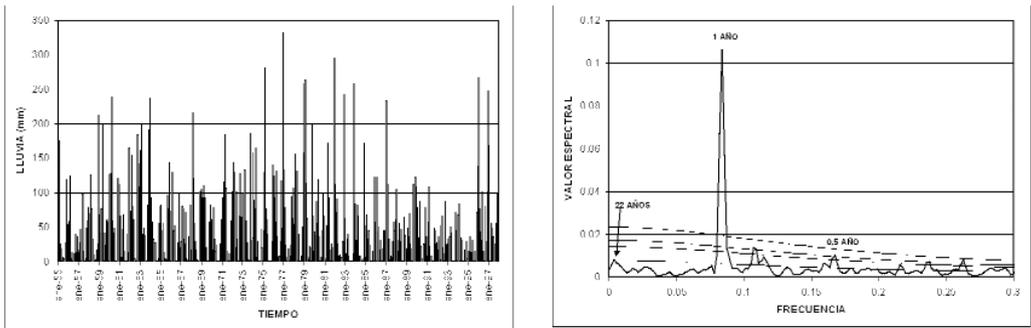


Figura 5. Lluvia caída en la central de Dílar entre 1955 y 1997 y sus valores espectrales.

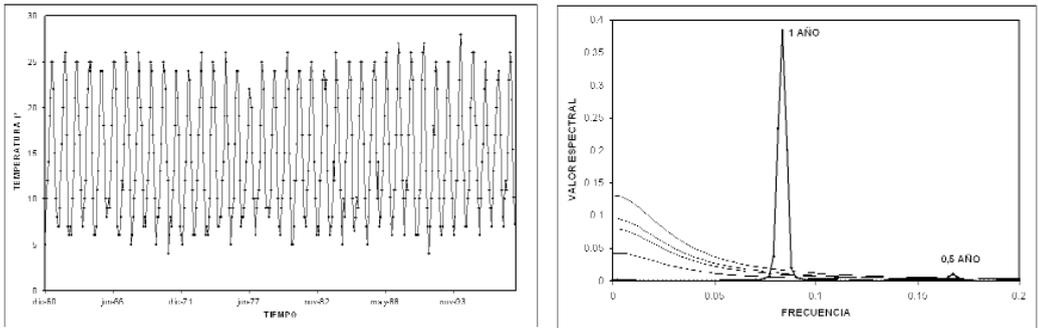


Figura 6. Temperatura mensual en la Base Aérea de Armilla entre 1961 y 1998 y su valor espectral.

dicha varianza se representa frente a la frecuencia de los armónicos, se obtiene una representación gráfica conocida como densidad espectral.

Existen diferentes técnicas matemáticas para el análisis espectral de una serie temporal. La metodología empleada en este trabajo ha sido la de Blackman-Tukey (Blackman and Tukey, 1958) por ser más robusta, donde la densidad espectral se ha calculado a partir de la función de covarianza del proceso.

El estimador de esta función es:

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{\pi} \left\{ \lambda(0)\hat{C}(0) + \sum_{k=1}^M \lambda(k)\hat{C}(k) \cos(\omega k) \right\}$$

donde  $\hat{S}(\omega)$ : es la densidad espectral estimada para la frecuencia  $\omega$ .

$\hat{C}(k)$ : es la función de covarianza para el paso  $k$ -ésimo.

$\lambda(k)$ : función de ponderación conocida como "lag window" y que sirve para ponderar con un menor peso los valores de covarianza para pasos  $k$  mayores y que son estadísticamente menos significativos.

El "lag window" utilizado en este trabajo ha sido el de Tukey :

$$\lambda(k) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{\pi k}{M}\right) \right\} \quad 0 \leq k \leq M$$

donde  $M$ : es el número de pasos de la función covarianza utilizados en la estimación de la densidad espectral.  $M$  como máximo puede valer  $N-1$ , donde  $N$  es el número de valores de la serie temporal.

Con valores de  $M$  altos, muchos de los picos que aparecen en la densidad espectral pueden no ser significativos. Por el contrario si se utilizan  $M$  pequeños, picos representativos pueden no estar representados en la densidad espectral. En este trabajo se ha utilizado un valor de  $M=N/2$  para resolver los picos presentes en la densidad espectral y un valor de  $M=N/4$  para confirmar cuales son los picos más significativos.

## RESULTADOS

El análisis de las series ha puesto de manifiesto la existencia de hasta cinco ciclos distintos: 22 años, 11 años, 3,2 años, 1 año y 0,5 año (Figuras 1 a 6). Los dos primeros cabe relacionarlos con ciclos solares, sin embargo la mayoría de los autores consideran que el ciclo de los once años junto con el de tres se deben al fenómeno conocido como NAO (North Atlantic Oscillation), que marca el comportamiento climático de las latitudes en las que nos encontramos. No obstante, algunos autores creen que el fenómeno conocido como ENSO (El Niño South Oscillation) también pueden influir en esta parte del planeta (Eddy, 1976; Hurrell, 1995; Pozo-Vázquez et al, 2000; Rodo et al, 1997). El ciclo de 1 año de duración cabe relacionarlo con el ciclo hidrológico. Por último, el ciclo de medio año también tiene un claro reflejo en algunas series y, aunque no se han encontrado referencias en la literatura que expliquen este ciclo, es razonable que también esté relacionado con lluvias vinculadas a la NAO, como ya se ha apuntado antes.

El ciclo de medio año aparece claramente representado en series termopluviométricas y foronómicas, mientras que en el medio subterráneo no tiene prácticamente reflejo, y su distribución en superficie no permite relacionarlo con ninguna actividad humana (regadío, bombeos, balsas de recarga). Los episodios de lluvia relacionados con este ciclo no se manifiestan en el acuífero en forma de recarga efectiva (variación en los niveles piezométricos). Por tanto, parece razonable asociar este ciclo en los niveles piezométricos a causas naturales relacionadas con lluvias que suceden con esta frecuencia.

Por otra parte, el anual está presente en todas las series estudiadas y de forma especialmente relevante, incluso llega a enmascarar a otros ciclos, en los datos pluviométricos. En este sentido, la intensidad mostrada por este pico en las series de lluvia, ha aconsejado su filtrado para poder observar otros ciclos más detalladamente. Esta importante presencia en todas las series piezométricas nos indicaría que las lluvias de ciclo anual constituyen el principal mecanismo de recarga, bien de forma directa o por infiltración desde los cauces superficiales. En relación con esto, los picos observados en los gráficos cobran, en general, mayor importancia en las proximidades de los principales cauces, que podría deberse a una mayor permeabilidad vertical en esos sectores, con lo que se podría estar delimitando con estos piezómetros la zona de influencia de recarga del cauce.

En torno a 3,2 años, coincidiendo con uno de los ciclos descritos para los fenómenos NAO y ENSO, aparecen en algunas series estudiadas un pico con un nivel de confianza por encima del 90%. Aunque no aparece en todas las series, se muestran con particular importancia en las series piezométricas, en primer lugar, y en las series foronómicas en segundo; en los datos pluviométricos no se presenta o lo hace de forma débil. Finalmente, en las series de temperaturas no se ha podido observar ni siquiera filtrando los ciclos anuales. Este comportamiento en las piezometrías podría indicar que las lluvias presentes en este ciclo tienen un peso relativo importante en la recarga del acuífero, más patente en las zonas mas permeables cercanas a las zonas centrales surcadas por los ríos principales que alimentan al acuífero. La aparente distribución espacial irregular de los piezómetros que muestran este ciclo, deja de serlo cuando se superpone la red de drenaje, observándose una importante relación espacial entre ambas. Esta hipótesis es coherente con las observaciones foronómicas, que presentan de forma clara este ciclo. Por otra parte, el hecho de que no aparezca este ciclo en sectores centrales del acuífero podría deberse a que su aparición está relacionada con recargas de poca importancia procedentes de la red de drenaje; dicha recarga se efectuaría al entrar los ríos en contacto con los materiales permeables de la Vega de Granada, procedentes

de los materiales que bordean el acuífero. Por tanto, los caudales que circulan por la red de drenaje, mediante un efecto de concentración de las lluvias caídas en la cuenca vertiente a la Vega, reflejaría la existencia de este ciclo; la escasa intensidad de las lluvias relacionadas con este ciclo limitaría la recarga procedente de los cauces a las zonas de borde del acuífero.

El ciclo de once años se presenta de forma nítida en las series piezométricas y foronómicas; en las de lluvia aparece poco o nada definido, probablemente por la intensidad del ciclo anual que lo enmascara. La intensidad con la que aparece en las series piezométricas, en muchos casos con igual importancia que el anual, indica que las lluvias caídas en relación con este ciclo tienen un importante peso en la recarga del acuífero. La presencia de este ciclo se aprecia de forma nítida en el borde Este del acuífero y en otros puntos próximos al límite Oeste. Hacia sectores centrales el efecto de este ciclo se amortigua, donde la intensidad del mismo es similar a la del ciclo anual. Cabe pensar, por tanto, que la aparición de este pico en las series piezométricas está también ligado a la recarga que proviene de la red de drenaje superficial recogido por la cuenca vertiente al acuífero.

Por último, en una serie pluviométrica (de las dos más largas disponibles con un registro de más de 50 años), se ha observado un quinto ciclo con un valor de 22 años, en principio relacionado con los ciclos de manchas solares. Cabe pensar que este ciclo también estaría presente en las series piezométricas en el caso de disponer de más registros históricos.

## CONCLUSIONES

El análisis espectral, particularmente el método de Blackman-Tukey, ha permitido detectar de forma sencilla y robusta la existencia de cinco ciclos diferentes en las series de datos hidrogeológicos estudiados.

Los ciclos observados no se muestran con la misma intensidad en todas las series analizadas, de tal forma que los ciclos más cortos (anual y semianual) presentan gran relevancia en las series termopluviométricas hasta casi anular a los ciclos de menor periodicidad (3,2, 11 y 22 años). Por el contrario, en las series de datos foronómicos y piezométricos, los ciclos de 3,2 y 11 presentan igual o más intensidad en muchos casos que los ciclos anuales y semianuales. Este comportamiento observado en el espacio indicaría que la lluvia no recarga el acuífero de la misma forma en toda su extensión; es decir, en unos sectores tienen mayor incidencia las lluvias con ciclos anuales, en otros las de periodo de once años y en otros la influencia se observa por igual. En menor medida, y atendiendo a la intensidad con la que se observan los picos de los ciclos, se aprecia una influencia en la recarga del acuífero de los periodos de 3,2 años y, por último y con menor importancia, se aprecia también el ciclo de medio año en los niveles piezométricos, que sería el ciclo de lluvias que menos aportaría a la recarga del acuífero.

De los datos pluviométricos y foronómicos estudiados, guardan más paralelismo con el comportamiento de la piezometría los segundos. Esta afirmación se basa en la intensidad de los picos observados. En este sentido, se puede afirmar que la recarga del acuífero está más influida por la circulación del agua en la red de drenaje que la caída directamente sobre la superficie permeable.

Es probable que los fenómenos climáticos de ciclos de 11 y 22 años no se reflejen en las lluvias por dos

motivos: a) Por que la intensidad de las lluvias anuales enmascaran a otros fenómenos climatológicos. b) Las precipitaciones ligadas a esos ciclos tienen un comportamiento irregular en el espacio y no se manifiestan en todas las estaciones pluviométricas. En ambos casos la red de drenaje modula las lluvias produciendo dos efectos, reducir la respuesta de las precipitaciones anuales y amplificar la señal de los otros picos climáticos.

Un estudio más detallado de la red de drenaje, de los periodos de funcionamiento de la misma, de la variación de la calidad química inducida por la recarga, y de los parámetros hidrodinámicos, conduciría a conocer mejor los mecanismos de la recarga en el tiempo y en el espacio.

Por último, cabe señalar el interés de estos resultados en la gestión de los recursos disponibles, tanto en lo que se refiere a la explotación de los distintos sectores en los que se podría dividir el acuífero como en la delimitación de áreas de recarga artificial.

## AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo se ha contado con la financiación del Proyecto de investigación BTE 2002-00159 del MEC y del Grupo de Investigación RNM-122, RSGIS, de la Junta de Andalucía.

## REFERENCIAS

- Blackman, R. B. y Tukey, J. W. 1958. *The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering*. Dover Publications, New-York.
- Eddy, J.A. 1976. The Maunder Minimum. *Science*, 192, 1189-1202.
- Hurrell, J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation, regional temperatures and precipitation. *Nature*, 269, 676-679.
- Jenkins, Gm. y Watts, D.G. 1968. *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, 525 pp.
- Luque-Espinar, J.A. 2001. *Análisis geoestadístico espacio-temporal de la variabilidad piezométrica. Aplicación a la Vega de Granada*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 298 pp.
- Pozo-Vázquez, D., Esteban-Parra, M.J., Rodrigo F.S., y Castro-Díez Y. 2000. An analysis of the variability of the North Atlantic Oscillation in the time and the frequency domains. *International Journal of Climatology*, 20, 1675-1692.
- Rodo, X., Baert, E., y Comin, F.A. 1997. Variations in seasonal rainfall in southern Europe during the present century: relationships with the North Atlantic Oscillation and the Niño-Southern Oscillation. *Climate Dynamics*, 13, 275-284.
- Taylor, C.J. y Alley, W.N. 2001. Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data: *U.S. Geological Survey Circular*, 1217, 68 p.