

# Una visión paleolimnológica de tres lagos kársticos (Zoñar, Estanya y Taravilla): evolución sedimentaria y paleohidrológica, clima e impacto humano e implicaciones para la gestión y conservación

B. Valero Garcés<sup>(1)</sup>, M. Morellón<sup>(1)</sup>, C. Martín Puertas<sup>(2)</sup>, A. Moreno<sup>(1)</sup>, P. Corella<sup>(1)</sup>, P. González Sampérez<sup>(1)</sup>, M. Rico<sup>(1)</sup>, P. Mata<sup>(2)</sup> y A. Navas<sup>(3)</sup>

(1) Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global. Instituto Pirenaico de Ecología (IPE) - CSIC. Campus de Aula Dei. Apdo 13034; Avda Montañana 1005. E-50059 Zaragoza, España.

blas@ipe.csic.es, mariomm@ipe.csic.es, amoreno@ipe.csic.es, pablocorella@ipe.csic.es, pgonzal@ipe.csic.es, mayterico@ipe.csic.es  
(2) Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. Polígono Río San Pedro s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz), España.  
celia.martin@uca.es, pilar.mata@uca.es

(3) Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental de Aula Dei (EEAD) - CSIC. Campus de Aula Dei. Avda. Montañana 1005. E-50059 Zaragoza, España.  
anavas@eead.csic.es

## RESUMEN

Se resumen los datos disponibles y previamente publicados de sondeos sedimentarios recuperados en tres lagos kársticos españoles: Taravilla en el Sistema Ibérico (provincia de Guadalajara), Estanya en el Prepirineo aragonés (provincia de Huesca) y Zoñar en el valle del Guadalquivir (provincia de Córdoba). El intervalo temporal que abarcan estas secuencias sedimentarias varía desde el último máximo glacial (desde hace 21000 años en Estanya) hasta el Holoceno tardío (desde hace 4000 en Zoñar y 2000 años en Taravilla). Los resultados muestran la gran variabilidad de ambientes de depósito que se desarrollaron en estos sistemas lacustres, principalmente ligados a fluctuaciones en el nivel de los lagos, la química de las aguas y cambios en las cuencas de drenaje. Los cambios climáticos han sido los principales responsables de esta gran variabilidad sedimentológica e hidrológica. El impacto de las actividades humanas en las cuencas de recepción ha sido perceptible desde época ibero-romana, pero especialmente a partir de la Edad Media, con un claro aumento de las tasas de sedimentación en los lagos. Las secuencias lacustres representan archivos detallados de cambio global en el pasado que son imprescindibles para conocer tanto la variabilidad climática regional como la dinámica de estos sistemas y así implementar políticas de conservación y gestión de estos espacios naturales y de los recursos hidrológicos y ecológicos que sustentan y estrategias de adaptación al cambio climático.

Palabras clave: cambio global, Holoceno, lagos kársticos, limnogeología, Península Ibérica

## ***A paleolimnological perspective of three karstic lake (taravilla, Zoñar and Estanya): Sedimentological and hydrogeological evolution climate and human impact and implications for management and restoration policies***

### ABSTRACT

*A paleolimnological perspective of three Spanish karstic lakes (Taravilla, Zoñar and Estanya): sedimentological and hydrological evolution, climate and human impact and implications for management and restoration policies. We synthesize the available, published paleolimnological information based on sediment core analyses from three Spanish karstic lakes: Taravilla in the Iberian Range (Guadalajara province), Estanya in the Pre-Prepirinean Range (Huesca province) and Zoñar in the Guadalquivir Basin (Córdoba province). The time span ranges from the last 21000 years in Estanya, about 4000 years in Zoñar and 2000 years in Taravilla. The multidisciplinary study shows large depositional changes in the lakes mostly related to water level and hydrochemical fluctuations and changes in the watershed. Climate change has been the main forcing to explain the hydrological changes in the lakes. Human impact in the watershed and the lakes has been documented since Iberian-Roman times and it has increased since the Medieval Ages with a much higher sediment delivery to the lakes. Lake sediment sequences contain detailed archives of global changes in the past, needed to understand the natural climate variability and the dynamics of the lacustrine systems. These data will help to implement conservation and restoration policies of aquatic ecosystems and also strategies for adaptation to future climate changes.*

*Key words: global change, Holocene, Iberian Peninsula, karstic lakes, Limnogeology*

## Introducción

El agua es un preciado recurso natural en la región Mediterránea, con una larga historia de uso tanto

para consumo humano como para diversas actividades agrícolas e industriales. Debido al aumento de la población, al creciente consumo de agua per cápita en países industrializados, a los problemas de conta-

minación y a los previsible cambios asociados al actual calentamiento global, existe una preocupación creciente por asegurar una gestión sostenible de los recursos hídricos (Álvarez Cobelas *et al.*, 2005). Los humedales, lagos y lagunas constituyen buena parte de los recursos hídricos de España (Casado de Otaola y Montes del Olmo, 1995; DGOH, 1996; Alonso, 1998), y han sido clasificados desde un punto de vista morfogenético (costeros y continentales) y de funcionamiento hidrogeológico (Borja y Borja, 2002; Durán *et al.*, 2004). Debido a la presencia de formaciones calcáreas y yesíferas en amplios sectores de la geografía española, algunos de los humedales continentales naturales más significativos tienen un origen relacionado, total o parcialmente, con procesos kársticos. Dentro de esta tipología se pueden distinguir varios casos en función de su contexto geológico: i) lagos relativamente profundos, originados por colapso – disolución, tanto en sustratos con yesos (por ejemplo, Banyoles (Girona) (Canals *et al.*, 1990), Arreo (Álava) (Rico *et al.*, 1995), Montcortés (Lleida) (Modamio *et al.*, 1988; Bayarri-Borja, 2005), El Tobar (Cuenca) (Vicente *et al.*, 1993), Estanya (Huesca) (López-Vicente, 2007; Morellón *et al.*, 2009), Zoñar (Córdoba, Valero Garcés *et al.*, 2006) como carbonatados (por ejemplo, las Torcas de la Cañada del Hoyo (Cuenca) (Romero Viana, 2007); ii) lagunas y humedales poco profundos en sustratos karstificados (yesos, carbonatos), pero con intervención de otros procesos como fracturación preferente, deflación o erosión preferente (por ejemplo, las lagunas saladas de la zona central del Valle del Ebro (González-Sampérez *et al.*, 2008) ; iii) origen mixto por karstificación y acción glacial/periglacial como el caso de Lago de Enol (Asturias) (Moreno *et al.*, en prensa); iv) por represamiento de un río o un manantial debido al crecimiento de tobas como las Laguna de Taravilla (Guadalajara) (Valero Garcés *et al.*, 2008), v) origen mixto por crecimiento de tobas en el curso de un río y muy influenciadas por el régimen fluvial como las Lagunas de Ruidera (Albacete- Ciudad Real) (Ordóñez *et al.*, 2005; Álvarez Cobelas y Cirujano, 2007).

Las peculiares características de los lagos kársticos debidas tanto a la morfología de sus cubetas, como a las características de su régimen hidrológico y a la hidroquímica de las aguas, determinan en gran medida la dinámica de los procesos sedimentológicos y biológicos. Como otros muchos sistemas lacustres, el balance hídrico está fuertemente determinado por los aportes subterráneos (Manzano *et al.*, 2002; Álvarez Cobelas, 2006). En los lagos relativamente profundos (> 10 m), los procesos de disolución, subsidencia y colapso han sido los responsables de la génesis de morfologías de tipo embudo con márgenes

de elevada pendiente y elevada relación profundidad/superficie. Esta morfología junto con la dominante alimentación subterránea ha llevado al desarrollo de lagos con elevada profundidad de la lámina de agua, estratificados estacional o permanentemente, incluso en regiones semiáridas con un balance hidrológico negativo (Morellón *et al.*, 2009). El tamaño relativamente pequeño de estos lagos, su localización en cuencas topográficamente cerradas (sin afluentes ni efluentes permanentes) y su conexión a acuíferos locales y/o regionales hace que estos sistemas sean muy sensibles a las fluctuaciones hidrológicas y experimenten considerables variaciones en el nivel del lago, composición química de las aguas y cambios asociados a la oxigenación de las aguas del fondo y al desarrollo de las comunidades biológicas (Wetzel, 2001; Cohen, 2003). En el caso de España, la importancia de los lagos como reservorios hídricos los ha hecho objeto de aprovechamientos para el consumo humano y agrícola y, consecuentemente, las afecciones en las cuencas de drenaje han sido significativas desde tiempos históricos. Los mayores efectos relacionados con el impacto de las actividades humanas – y los cambios climáticos - en el entorno de estos lagos se deben a: i) afecciones al régimen hidrológico, tanto en cuanto a los niveles en el lago como a la calidad de las aguas (composición química) (Díaz *et al.*, 1998), ii) cambios en los ciclos limnológicos y la estructura ecológica del lago debidos, por ejemplo, al aumento de fertilizantes y la eutrofización (Bennion *et al.*, 2004) y iii) el aumento de la tasa de sedimentación (Binford *et al.*, 1987). La gestión y en su caso, restauración, de estos ecosistemas acuáticos, requiere de un profundo conocimiento de los factores que han determinado su evolución con enfoques más amplios que los estrictamente ecológicos (Montes *et al.*, 1995) y escalas temporales mayores que las de la simple observación de unas pocas décadas (Battarbee, 1999).

En este trabajo se resumen los estudios paleolimnológicos basados en sondeos de tres lagos kársticos muestreados durante la campaña LIMNOCLIBER realizada en el año 2004: Laguna de Estanya (Huesca), Laguna de Zoñar (Córdoba) y Laguna de Taravilla (Guadalajara) (Figura 1). Los resultados detallados han sido publicados en otras revistas (ver listado de referencias). Dos de estos sistemas lacustres (Estanya y Zoñar) están dominados por la recarga subterránea y las cubetas se disponen en cuencas topográficamente cerradas sin emisarios superficiales; en el caso de Taravilla la alimentación es mixta (superficial y subterránea), pero el sistema es hidrológicamente abierto, con un arroyo afluente superficial y un emisario que drena la laguna hacia el río Tajo. En el caso

de los lagos cerrados, el análisis pluridisciplinar de las secuencias sedimentarias demuestra la gran variabilidad de ambientes de depósito que se han sucedido debido a la rápida respuesta a cambios climáticos que ocurren desde escalas milenarias (desde el último máximo glacial) a anuales. En Taravilla, las fluctuaciones hidrológicas son de menor entidad,

pero los cambios en la tasa de aporte de sedimentos de los arroyos afluentes se pueden relacionar con cambios climáticos. En todos los casos, se puede identificar también el impacto antrópico durante el periodo histórico en los ecosistemas lacustres y en las cuencas de recepción.

Las reconstrucciones paleolimnológicas como las

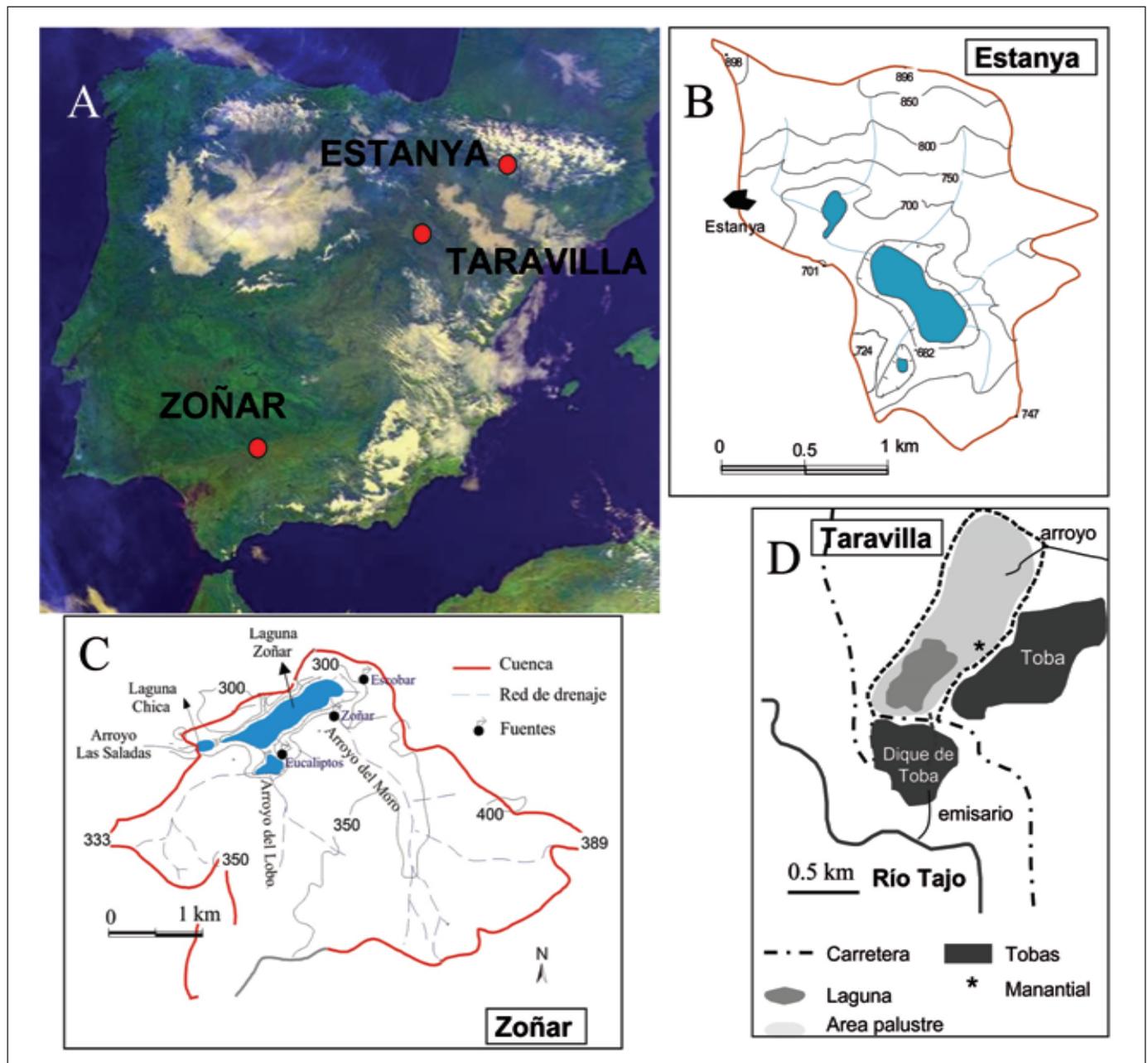


Figura 1. A. Localización de los lagos kársticos estudiados: Zoñar (Córdoba), Taravilla (Guadalajara) y Estanya (Huesca). Mapas de las cuencas vertientes a los lagos: B. La laguna de Estanya. C. La laguna de Zoñar. D. La laguna de Taravilla  
 Figure 1. A. Geographic location of the studied karstic lakes: Zoñar (Córdoba), Taravilla (Guadalajara) and Estanya (Huesca). Maps of the watersheds and lakes: B. Estanya Lake. C. Zoñar Lake . D. Taravilla Lake

descritas en este trabajo son útiles para diseñar políticas de conservación y gestión ya que permiten conocer la variabilidad natural de estos sistemas, así como su capacidad de respuesta a factores internos y externos (Battarbee, 1999). Por otra parte, muestran el gran potencial que tienen los lagos kársticos como archivos de los cambios globales (climáticos y antrópicos) en el contexto de la Península Ibérica.

### Lagos kársticos estudiados

La Laguna de Zoñar (37° 29' 00" N, 4° 41' 22" W, 300 m s.n.m.) está localizada en la Depresión del Guadalquivir y es el humedal endorreico más extenso (37 ha), con mayor profundidad (14 m) y con los niveles hídricos más estables de Andalucía (Figura 1 C). Aunque existe una influencia tectónica (presencia de fallas), la laguna tiene un origen fundamentalmente kárstico, relacionado con la disolución de materiales del Triásico (Moya, 1986; Valero Garcés *et al.*, 2006). El ciclo hidrológico de la laguna está controlado principalmente por precipitación (0.177 Hm<sup>3</sup>), aguas subterráneas (0.473 Hm<sup>3</sup>), escorrentía (0.168 Hm<sup>3</sup>) y el drenaje de la laguna es principalmente por evaporación (0.8 Hm<sup>3</sup>) (Enadimsa, 1989). La laguna de Zoñar es un sistema monomítico, con una capa fótica de 3 m de profundidad y estratificación térmica durante la época estival (desde mayo a septiembre) alcanzándose la anoxia total a partir de los 6 m.

La Laguna de Estanya (42°02' N, 0°32' E; 670 m. s.n.m.) forma parte de un complejo kárstico con varias dolinas, algunas de ellas colmatadas, emplazado sobre materiales calcáreos y yesíferos Triásicos de facies Muschelkalk y Keuper en las Sierras Exteriores del Pirineo aragonés (López-Vicente, 2007). La laguna es una uvala compuesta por dos dolinas interconectadas de 20 y 12 m de profundidad, separadas por un umbral, actualmente sumergido a 2-3 m de profundidad. La cuenca de recepción es pequeña (2.45 km<sup>2</sup>) y la superficie del lago de unas 19 ha (Figura 1 B) (Ávila *et al.*, 1984; López-Vicente, 2007). La laguna no tiene arroyos afluentes superficiales ni emisarios permanentes; la recarga se produce por surgencias subterráneas y la pérdida esencialmente por evaporación. El lago es monomítico con estratificación termal y anoxia en el fondo durante la primavera y el verano (Ávila *et al.*, 1984).

La laguna de Taravilla (40°39'N; 1°59'O; 1100 m. s.n.m., Cuenca Alta del Tajo, Guadalajara) es una laguna de pequeñas dimensiones (2.11 ha) formada por el represamiento de un valle lateral del río Tajo debido al crecimiento de una barrera de tobas (Figura 1 D) (Valero Garcés *et al.*, 2008). La alimentación de la laguna es subterránea, con una fuente en el margen

oriental, junto a la cual se desarrolló un edificio de tobas y, probablemente, otras surgencias subacuadas. Un arroyo efímero drena una cuenca de 5.5 km<sup>2</sup> y desemboca en el lago en el extremo noreste. El único efluente del lago hacia el río Tajo sólo es funcional durante los periodos más húmedos. La laguna presenta márgenes abruptos y verticales y un fondo plano, con una profundidad media de 11 m y sin estratificación de las aguas (Valero Garcés *et al.*, 2008). La zona palustre es muy amplia y está colonizada actualmente por vegetación.

### Técnicas y metodologías en paleolimnología

La campaña limnogeológica LIMNOCLIBER 2004 se llevó a cabo en primavera de 2004, en colaboración con el Limnological Research Center (LRC-Universidad de Minnesota). Previamente se había realizado una campaña de sísmica con un sistema de alta resolución, monocanal con una frecuencia de 3.5 kHz (GeoAcoustic pinger source) en los tres lagos seleccionados: Estanya, Taravilla y Zoñar. La penetración fue mínima en el caso de la laguna de Zoñar, donde se pudo reconstruir la batimetría del lago pero no la disposición de los sedimentos lacustres. En Taravilla, se identificó un cambio en el tipo de propiedades sísmicas de los sedimentos a, aproximadamente, 2 m por debajo de la interfase sedimento/agua que sondeos posteriores confirmaron como el cambio litológico más significativo del registro (Valero Garcés *et al.*, 2008). Sólo en Estanya se pudo reconstruir la estructura general del relleno de las dos cubetas, revelando una secuencia sedimentaria de más de 15 metros de potencia (Morellón *et al.*, 2009). Los testigos de sedimento se extrajeron en los tres lagos mediante un sondeador de pistón Kullenberg. Adicionalmente, en Estanya se obtuvo en el 2006 un sondeo de 11 m de longitud con una plataforma y sondeador UWITEC del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC).

Una vez obtenidos los sondeos se dividieron en secciones de un metro y medio aproximadamente. Todos los testigos fueron enviados al LRC, donde se seccionaron longitudinalmente en dos mitades, una de archivo que fue almacenada en cámaras frigoríficas, y otra que se utilizó para el muestreo. Estas últimas se fotografiaron mediante un DMT Core Scanner y se midieron las propiedades físicas mediante un GEOTEK®. Los sondeos se describieron mediante análisis sedimentológicos detallados (color, texturas y estructuras sedimentarias, tamaño de grano, facies y fósiles) y estudio microscópico de frotis de sedimentos siguiendo el procedimiento del LRC (Schnurrenberger *et al.*, 2003).

Se seleccionaron los sondeos más largos y completos de cada lago para llevar a cabo el muestreo para los análisis mineralógicos, geoquímicos, biológicos y cronológicos. La composición geoquímica de los sedimentos se analizó mediante el contenido en carbono orgánico total (TOC), carbono inorgánico total (TIC) y azufre total (TS) mediante un analizador elemental LECO SC 144DR, el contenido en nitrógeno total (TN) mediante un analizador elemental VARIO MAX CN y la sílice biogénica (BSi) mediante método químico de extracción alcalina. La composición mineralógica se obtuvo a partir de difracción de rayos-X, apoyada en la caracterización petrográfica (frotis y microscopía electrónica). Los análisis geoquímicos se realizaron mediante un escáner de Fluorescencia de Rayos X (FRX) a una resolución variable entre 2 mm y 1 cm. La composición isotópica de carbono y oxígeno de minerales autigénicos (carbonatos) y de la materia orgánica total se analizó siguiendo las metodologías clásicas. En cuanto a indicadores biológicos, se estudiaron diatomeas y polen. En los intervalos con sedimentos laminados en Zoñar se llevó a cabo un estudio microestratigráfico a partir de láminas delgadas para identificar cambios sedimentarios a microescala y desarrollar una cronología de alta resolución siguiendo la metodología descrita por Brauer y Casanova (2001) basada en el contaje de varvas. La descripción detallada de las metodologías utilizadas

para el muestreo y la preparación de las muestras puede consultarse en Martín Puertas *et al.* (2008 a), Morellón *et al.* (2008) y Valero Garcés *et al.* (2006).

Para determinar la edad de las secuencias sedimentarias se utilizaron técnicas de datación de restos vegetales (terrestres preferentemente, acuáticos en otros casos y materia orgánica total en ausencia de macrorestos) y de concentrados de polen mediante AMS  $^{14}\text{C}$ . Las dataciones radiocarbónicas fueron calibradas mediante el software Calib 5.0 que utiliza la curva de calibración más actualizada (INTCAL04) de Reimer *et al.* (2004). La parte superior de las secuencias se dató con  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$  siguiendo metodología estándar (Last and Smol, 2001). Una discusión detallada de los modelos cronológicos aparece en las publicaciones específicas: Estanya (Morellón *et al.*, 2008, 2009), Zoñar (Martín Puertas *et al.*, 2008 a) y Taravilla (Moreno *et al.*, 2008).

#### Variabilidad hidrológica y sedimentológica en lagos kársticos

##### *A escala milenaria, desde el último máximo glacial (últimos 21000 años)*

De las tres secuencias estudiadas, la de Estanya es la que cubre el mayor rango temporal (últimos 21000

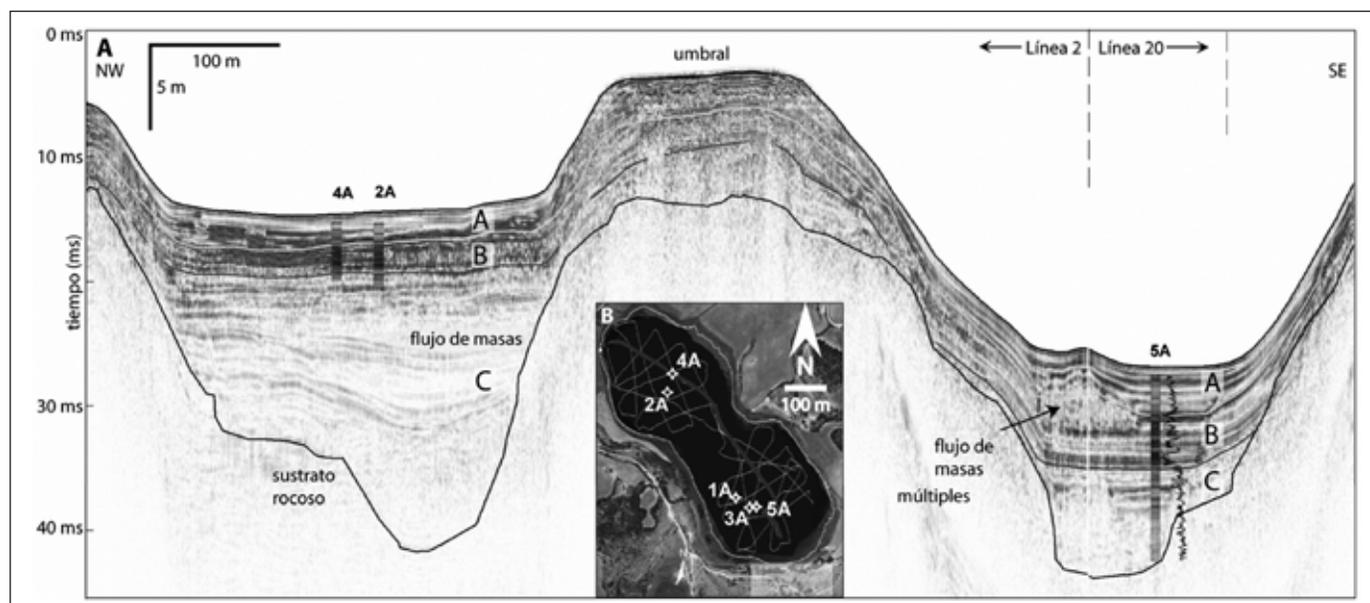


Figura 2. A. Perfil sísmico realizado en la laguna de Estanya con la división en las principales unidades sísmicas, localización de los sondeos y presencia de flujos de masas. B. Ortofoto de la cuenca lacustre con las líneas sísmicas medidas y la ubicación de los cinco puntos de sondeo (1A-5 A)

Figure 2. A. Seismic profile from Estanya Lake with the main seismic units, location of the cores and gravitational deposits. B. Aerial photo of the lake basin with the location of the seismic lines and the five retrieved cores (1 A – 5 A)

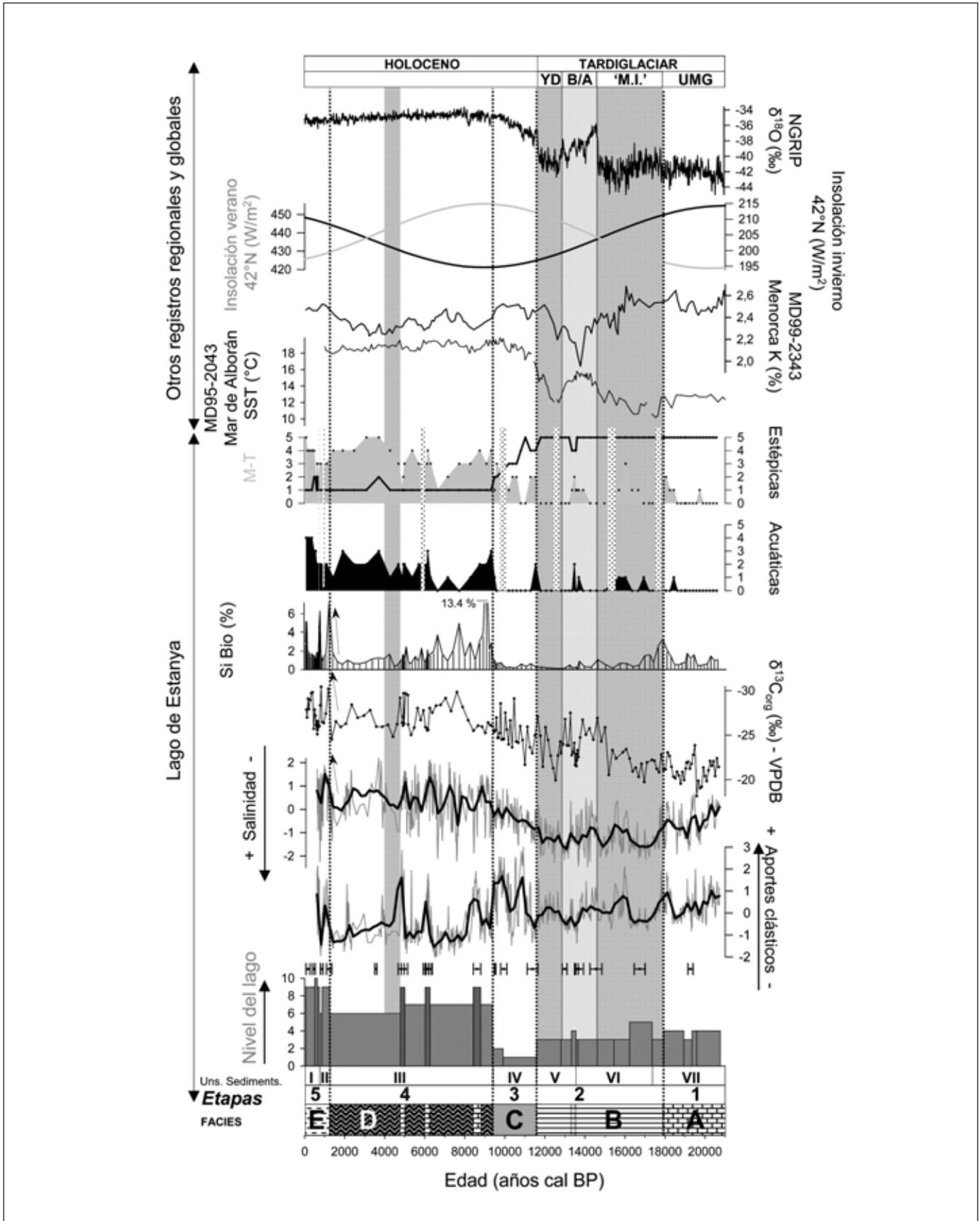
años) y demuestra la gran variabilidad de ambientes de depósito dominantes en un lago kárstico topográfica e hidrológicamente cerrado durante el Cuaternario reciente. El estudio sísmico del lago de Estanya (Fig. 2) evidenció una secuencia de más de 15 m de potencia que comprende: i) una unidad basal, sísmicamente transparente y restringida a los depocentros de ambas cubetas, depositada durante el tardiglaciario; ii) una unidad intermedia caracterizada por reflectores continuos de alta amplitud, depositada a lo largo del Holoceno y iii) una unidad superior con reflectores paralelos muy marcados, depositada durante los últimos 800 años. Varios depósitos de gravedad se identificaron en ambas cubetas. Se analizaron un total de cinco sondeos. El modelo cronológico está basado en 17 dataciones de  $^{14}\text{C}$  AMS (Morellón *et al.*, 2009)

Las facies sedimentarias y los indicadores geoquímicos y biológicos han permitido reconstruir la evolución del lago de Estanya durante los últimos 21000 años. Las facies sedimentarias y la composición geoquímica permiten identificar las variaciones en el nivel del lago, los periodos de mayores aportes detríticos y las variaciones en salinidad. Un análisis de componentes principales de los datos de fluorescencia de Rayos X permite identificar un vector asociado a los aportes clásticos (mayores durante el tardiglaciario y algunos eventos en el Holoceno y los últimos 800 años) y otro a los minerales evaporíticos (mayor formación de yeso durante las fases de lago salino en

el Holoceno) (Fig. 3). La sílice biogénica muestra un aumento de la productividad orgánica en el Holoceno y algunos periodos del tardiglaciario. Un aumento de la aportación algal a la materia orgánica acumulada durante el Holoceno se evidencia por los cambios en la composición isotópica de la materia orgánica. Estos cambios son paralelos a los mostrados por la vegetación: un aumento de los taxones mesotermófilos durante el Holoceno y en algunos periodos del tardiglaciario que indican fases más cálidas se corresponden con aumento de las plantas acuáticas que reflejan mayor nivel de las aguas del lago. La secuencia de Estanya se ha dividido en 7 unidades sedimentarias, que se correlacionan con las unidades sísmicas definidas previamente, y que se agrupan a su vez en cinco estadios que representan distintos ambientes de depósito y explican la evolución de las lagunas a lo largo de los últimos 21000 años (Fig. 3) (Morellón *et al.*, 2009): i) un lago salobre, somero, con producción de calcita que se estableció durante el periodo glaciario (21 – 17.3 ka BP), tal y como sugiere el depósito de limos carbonatados, y probablemente después de un periodo de aumento de la actividad kárstica (disolución y colapso) que creó más espacio de acomodación en la cuenca; ii) un lago salino permanente, relativamente profundo durante el tardiglaciario (17.3 – 11.6 ka BP), caracterizado por el depósito de limos versicolores bandeados con yeso, calcita y arcillas, que se estableció una vez que la cuenca se selló y las pérdidas por aguas subterráneas se redujeron;

Figura 3. Resumen del registro paleohidrológico de Estanya (últimos 21000 años). Incluye (de abajo a arriba): unidades sedimentarias, facies, estimación de los cambios relativos en el nivel del lago, inferidos a partir de las facies sedimentarias, aportes clásticos y salinidad (puntuaciones de los dos ejes principales deducidos a partir del análisis de componentes principales (ACP) de los datos de geoquímica elemental de alta resolución), con datos originales (gris) y suavizado (media móvil de periodo 10), isótopos de materia orgánica ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ), sílice biogénica (Si Bio) y concentración de polen de plantas acuáticas, estépicas y mesotermófilas (M-T). Los intervalos políticamente estériles están marcados como bandas verticales con punteado superpuestas a estos 3 últimos indicadores. En la parte superior, otros registros globales y regionales comparables con Estanya (de arriba abajo):  $\delta^{18}\text{O}$  del sondeo de Groenlandia NGRIP (Rasmussen *et al.*, 2008), cambios en la insolación de invierno y verano a 42°N, registro de potasio (K) (%) en el sondeo marino MD99-2343 (Menorca) (Frigola *et al.*, 2008) y registro de temperatura superficial del mar (SST, °C) inferido a partir del análisis de alkenonas en el sondeo marino MD95-2043 (Mar de Alborán) (Cacho *et al.*, 1999). Se indica también la escala temporal con los grandes periodos climáticos y otros eventos registrados en el tardiglaciario: YD (Younger Dryas), B/A (Bölling/Allerød), M.I. (Mystery Interval), y UMG (Último Máximo Glaciario). Leyenda de facies: A Limos grises carbonatados bandeados a laminados; B Limos versicolores bandeados a laminados con intervalos de yeso, calcita y arcillas; C Limos grises masivos carbonatados con restos vegetales, yeso y bioturbación; D Alternancia de tapetes microbianos versicolores finamente laminados con aragonito y yeso y sapropel marrón, masivo a laminado con yeso; E Limos arcillosos grises y negros laminados a bandeados

Figure 3. Synthesis of the Estanya paleohydrological record for the last 21000 years. From bottom to top: sedimentary units, facies, estimated lake level changes from sedimentary facies, clastic input and salinity (values of two main PCA axes from elemental geochemistry data set using original data (grey) and 10 point mobile average) organic matter isotopes ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ), biogenic silica (Si Bio) and pollen concentration of aquatic, stepic and mesothermophilous (M-T) plants. Sterile pollen intervals are marked with vertical bars. Global and regional records are also shown in the upper part (from top to bottom):  $\delta^{18}\text{O}$  of Greenland NGRIP (Rasmussen *et al.*, 2008), winter and summer insolation at 42°N, potassium (K) (%) in marine core MD99-2343 (Minorca) (Frigola *et al.*, 2008) and surface sea temperature (SST, °C) from alkenones in marine core MD95-2043 (Alboran Sea) (Cacho *et al.*, 1999). The temporal scale of the main climate periods and events is also indicated: late glacial, YD (Younger Dryas), B/A (Bölling/Allerød), M.I. (Mystery Interval), and UMG (Last Glacial Maximum). Facies legend: A Grey, banded to laminated carbonate silt; B Variegated, banded to laminated silts with gypsum, calcite and clay-rich intervals; C Grey, massive carbonate silts with plant remains, gypsum and bioturbation textures. D Variegated, finely laminated microbial mats with aragonite and gypsum and sapropelic layers with massive and laminated gypsum; E Grey to black, laminated to banded clayish silts



iii) un lago efímero, salino con llanura tipo "mud-flat" asociada con depósitos de limos carbonatados masivos con bioturbación y yeso durante la transición al Holoceno (11.6 – 9.4 ka BP); iv) un lago salino con depósito de facies laminadas de yeso y laminaciones algales y de depósitos clásticos durante periodos de mayor escorrentía (9.4 – 0.8 ka BP); v) un lago salobre a dulce, profundo, con un aporte detrítico muy importante y anoxia estacional o permanente en el hipolimnion durante los últimos 800 años, tal y como indica el depósito de limos arcillosos grises y negros, laminados a bandeados, similares a los sedimentos distales actuales de la laguna (Fig. 3).

La variabilidad hidrológica reconstruida en el lago de Estanya sugiere que los cambios climáticos han sido los principales agentes durante los últimos 21000 años, afectando tanto a la salinidad del agua como al nivel del lago o a la estratificación de las aguas. Sin embargo, otros procesos como la karstificación del sustrato, la actividad de procesos gravitacionales en el talud o cambios en los usos del suelo durante el último milenio han sido también significativos (Morellón et al., 2009).

### ***El Holoceno tardío (últimos 4000 años)***

La secuencia de la laguna de Zoñar nos permite conocer con mayor detalle y resolución la evolución reciente de un lago kárstico durante el Holoceno tardío. En esta laguna se estudiaron ocho testigos de sedimentos que abarcan los últimos 4.000 años, según un modelo cronológico basado en 13 dataciones AMS  $^{14}\text{C}$ . El registro sedimentario está esencialmente formado por una alternancia de sedimentos masivos y laminados. Los sedimentos masivos con mayor susceptibilidad magnética se han interpretado como periodos de mayor aporte terrígeno (con mayor porcentaje de cuarzo y arcillas) mientras que los laminados corresponden a periodos donde predominan condiciones anóxicas en el fondo del lago y sedimentación carbonatada (Martín-Puertas et al., 2008a). Los perfiles de Ti y Zr (Figura 4) identifican con valores más altos los intervalos más detríticos. El aragonito y los valores mayores de la relación Mg/Ca están asociados a momentos de mayor concentración de las aguas. Los mayores contenidos en yeso y S marcan las fases evaporíticas (Martín-Puertas et al., 2008a). Por otro lado, las condiciones anóxicas en el sedimento vienen indicadas por la relación U/Th (Figura 4) (Martín-Puertas et al., 2008b).

Los datos sedimentológicos (facies con texturas edáficas) y geoquímicos (perfil edáfico) indican que, durante el tercer milenio antes de nuestra era, el lago

se encontraba seco e incluso se desarrolló un suelo. Es a partir de 2800 BP (850 a.C.), coincidiendo con el fin de la crisis de aridez global (Mayewski et al., 2004), cuando la laguna empieza a inundarse, formándose un lago efímero que perdura hasta 2600 BP (650 a.C.), y que posteriormente evoluciona a un lago permanente. Paralelamente, la vegetación regional cambia y se produce un aumento del polen arbóreo. Estas condiciones se mantienen hasta 1600 BP (350 d.C.) durante casi un milenio que es el más húmedo de todo el Holoceno tardío: el Período Húmedo Ibero Romano (IRHP) (Martín-Puertas et al. 2008a; Martín-Puertas, et al., 2009). El desarrollo de la civilización Ibera en Andalucía ocurre durante la primera parte de este periodo húmedo (siglo V y principios del siglo IV a.C.) (Chapa Brunet, 1998). El polen de olivo parece ser un excelente indicador de la actividad antrópica en la cuenca (Martín-Puertas et al. 2008a). Durante este periodo que se corresponde con el mayor desarrollo de la civilización iberica, se observa un importante aumento del olivo (*Olea europaea*) (hasta el 60%). Estos porcentajes llaman la atención para ser un reflejo exclusivo del olivar natural, ya que sólo se vuelven a repetir en el siglo XX. Valores tan elevados de polen de olivo sugieren un aprovechamiento antrópico local, o incluso un posible cultivo incipiente, resultado del fomento del desarrollo de esta especie frente al resto de la vegetación arbórea. Sin embargo, son necesarios más trabajos arqueológicos para sustentar definitivamente el cultivo iberico del olivo en Zoñar, que claramente se continuó durante toda la época romana (Martín-Puertas et al., 2009).

Durante las épocas Ibera y Romana, la sedimentación en Zoñar se componía de láminas anuales (varvas) formadas por una subcapa orgánica, otra de calcita y otra detrítica (Martín-Puertas et al. 2008a). El lago de Zoñar tenía una profundidad de agua superior a la actual (es decir, mayor de 14 m), con estratificación permanente (lago meromictico) y *blooms* primaverales de algas. El aumento de la relación entre diatomeas plantónicas y bentónicas también indica un mayor nivel del lago durante este periodo. El estudio microestratigráfico de la laminación indica la presencia de cambios estacionales en el régimen de precipitaciones cada 60 años aproximadamente y alternancia de años más y menos lluviosos (Martín-Puertas et al, 2008a).

Alrededor del 2100 BP (150 a.C) ocurre un cambio en las condiciones del lago que provoca la pérdida de la laminación en los sedimentos depositados en el fondo y la precipitación de yeso (Fig. 4), apuntando a un descenso en el nivel del lago y un aumento en la concentración química de las aguas. Otros registros del Mediterráneo (Caroli y Caldara, 2006; Magny et

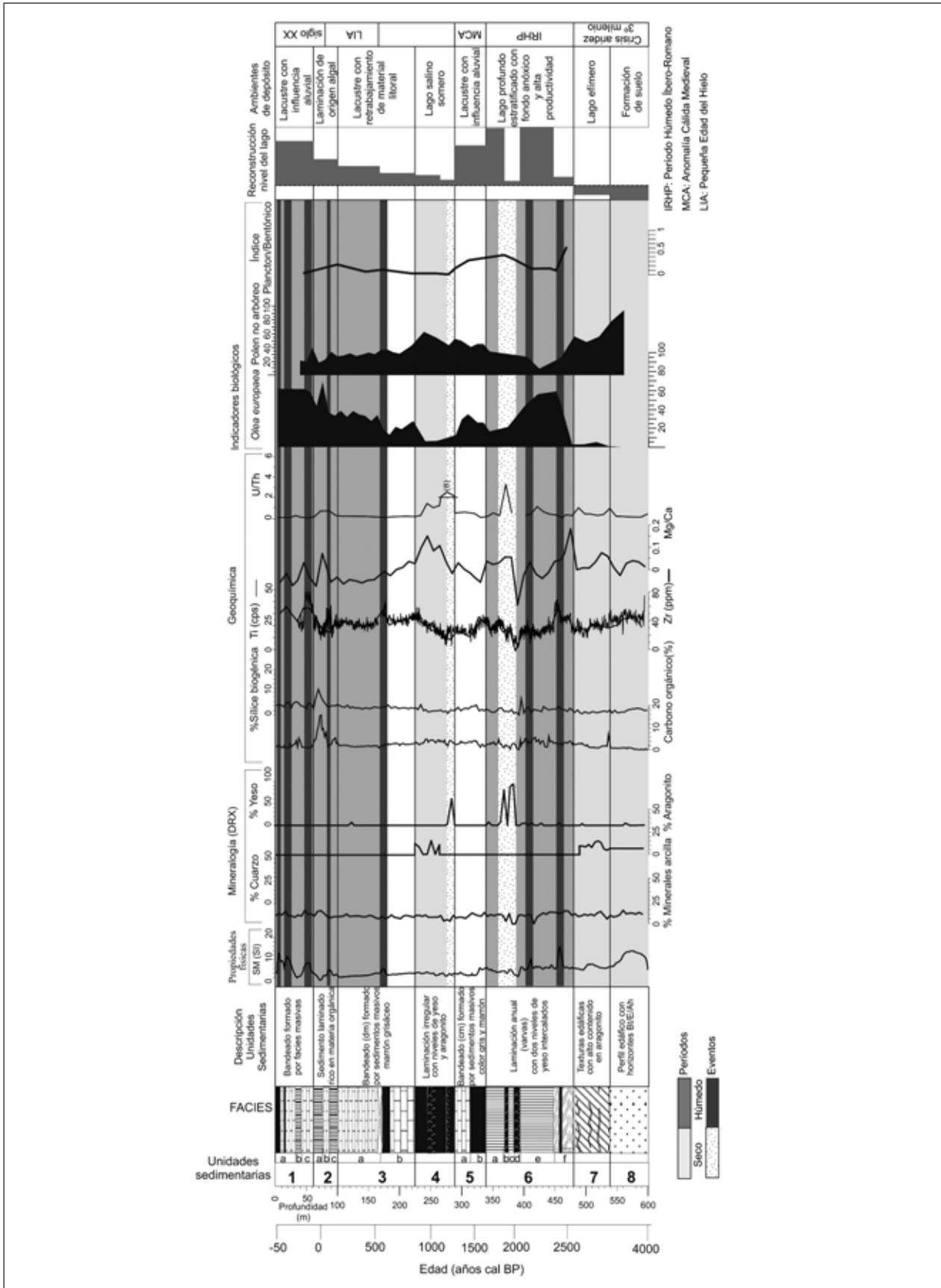


Figura 4. Resumen del registro de Zoñar. Descripción de facies sedimentarias, propiedades físicas, mineralogía, geoquímica, polen, reconstrucción de los ambientes de depósito y cronología  
 Figure 4. Synthesis of the Zoñar record. Facies description, physical properties, mineralogy, geochemistry, pollen, reconstruction of depositional environments and chronology

al., 2007), de zonas glaciares alpinas (Magny, 2004) y de registros fluviales en la Península Ibérica (Macklin *et al.*, 2006) corroboran un aumento de la aridez durante este intervalo de tiempo a escala regional. Sin embargo, este periodo coincide con la conquista romana de Andalucía y el máximo desarrollo del Imperio por lo que no es descartable la existencia de un factor antrópico en el descenso de nivel del lago (aprovechamiento del agua). Tras este periodo seco, se reanuda la sedimentación laminada, que permanece hasta el año 1600 BP (350 d.C.) caracterizada por un nuevo aumento del nivel del lago, estratificación de las aguas, *blooms* primaverales y fondos anóxicos. Históricamente, este período coincide con el principio de la crisis romana del siglo III y el comienzo de la decadencia del Imperio (Martín-Puertas *et al.*, 2009). De 1600 a 1300 BP (350-650 d.C.) se observa un período de transición hacia condiciones más secas que palinológicamente queda bien marcado por un aumento del componente herbáceo en la vegetación regional. El índice de diatomeas planctónicas/bentónicas disminuye, indicando una bajada del nivel del lago. En torno al siglo VII (650 d.C.) las condiciones de la laguna vuelven a ser adecuadas para la precipitación de yeso en un lago somero, con elevada concentración química de las aguas. Este depósito de yeso ocurre durante el principio del llamado Período Cálido Medieval o Anomalía Climática Medieval, una etapa árida y de temperaturas más altas (Crowley y Lowery, 2000; Osborn y Briffa, 2006; Seager *et al.*, 2007).

### **El último milenio**

Durante el último milenio, los lagos kársticos muestran variaciones hidrológicas y sedimentológicas en respuesta tanto a cambiantes condiciones climáticas como a un aumento de la presión antrópica sobre las cuencas de drenaje y los propios lagos.

Dentro de un contexto general de nivel del lago más elevado y un mayor aporte de sedimentos, el registro del Lago de Estanya muestra grandes fluctuaciones hidrológicas y medioambientales durante los últimos 800 años (Figura 5). El intervalo de tiempo comprendido entre los años 1150 d. C y 1300 d. C está caracterizado por condiciones más cálidas y secas, tal y como demuestra el depósito de yeso y materia orgánica típicos de lagos salinos y someros y, como se deduce de la vegetación, caracterizada por abundancia de sabinas, elementos mediterráneos, la relativa escasez de mesófitos y el bajo desarrollo de las plantas acuáticas. La baja concentración en cultivos indica también una presión humana relativamen-

te baja y sus fluctuaciones, paralelas a los cambios en la vegetación natural, indican un control climático en dichos cambios. Esta etapa coincide con el Período Cálido Medieval (PCM).

En Zoñar, condiciones generalmente áridas ocurren desde el siglo VII hasta el siglo XVI (1550 d.C.) caracterizadas por la presencia de yeso y posteriormente de facies laminadas con aragonito (Figura 4). Durante todo este periodo la laguna tenía dimensiones mucho más reducidas y la zona nororiental no estaba inundada.

En Estanya, tras el PCM se observa un aumento generalizado del nivel del lago, paralelo a un descenso en la salinidad, tal y como indica el predominio de facies clásticas y la práctica ausencia de sales y un descenso en las temperaturas, deducido a partir del aumento en coníferas respecto al resto de la vegetación natural. Esta etapa fría y relativamente húmeda se conoce en la literatura como la Pequeña Edad del Hielo (PEH) y está caracterizada por una estructura interna compleja en Europa y, particularmente, en el Mediterráneo (Luterbacher *et al.*, 2005).

Entre 1300 y 1380 d. C. se registra una etapa húmeda inicial, caracterizada por el depósito de facies laminadas, y el aumento de vegetación acuática y litoral y mesófitos, seguida de una crisis de aridez (1380 – 1450 d. C.) durante la cual reaparecen los yesos y se aprecia un descenso en los cultivos, tal y como documentan Riera *et al.* (2004) y Lacarra (1972). Durante los siguientes 300 años (1450-1750 d. C.), se observa una recuperación en el nivel del lago, con el depósito de facies clásticas masivas ricas en materia orgánica terrestre y el aumento de las diatomeas planctónicas. Este período más húmedo permitió también la expansión de la vegetación arbórea, especialmente de los robles y un aumento en la actividad agraria, tal y como indica el aumento en el polen de plantas cultivadas y la documentación histórica (Lacarra, 1972). Este período húmedo también se ha identificado en otros registros de la Europa Mediterránea (Luterbacher *et al.*, 2005) y la Península Ibérica (Benito *et al.*, 2003).

Los cambios más significativos ocurren en Zoñar en el siglo XVI, durante esta fase húmeda de la PEH (Fig. 4) y están caracterizados por un incremento de material detrítico asociado a procesos de escorrentía, un aumento de las diatomeas planctónicas y de algunas plantas acuáticas que sugieren un aumento del nivel del lago y una inundación de las zonas más someras del extremo NE de la cuenca (Martín-Puertas *et al.* 2008a). Las primeras fases de la PEH (siglo XIV) no parecen haber tenido un impacto hidrológico tan notable en el sur de la Península como en el norte, a juzgar por la diferente respuesta de Zoñar y Estanya.

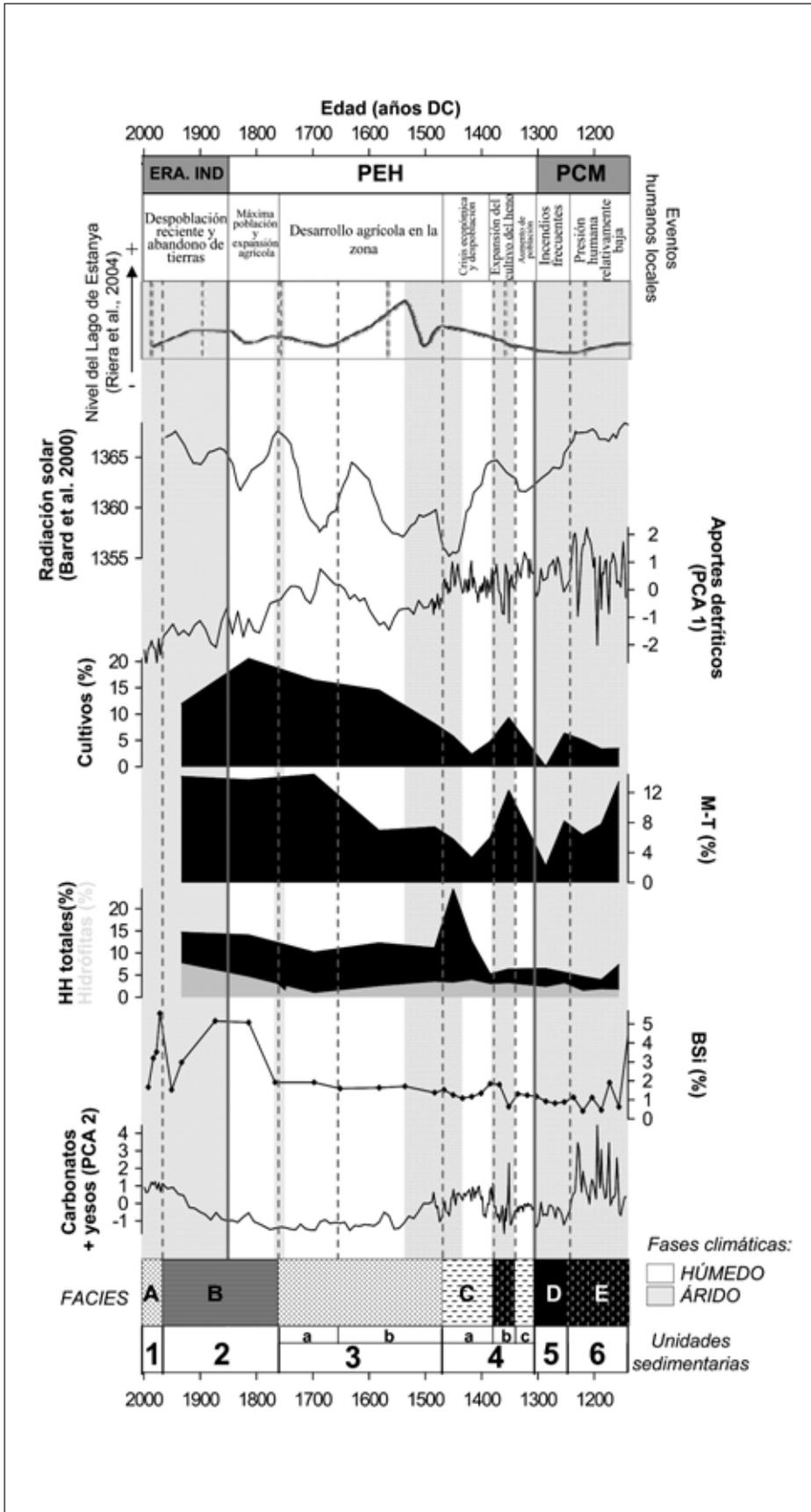


Figura 5. Resumen del registro paleoambiental de Estanya de los últimos 800 años. Incluye (de abajo a arriba): división en unidades sedimentarias, facies sedimentarias, contenido en carbonatos y yesos (deducido a partir del Análisis de Componentes Principales de los datos de geoquímica elemental de alta resolución), isótopos de materia orgánica  $\delta^{13}C_{org}$ , sílice biogénica (BSi), contenido en polen de hidrofítas totales (HH, negro) y acuáticas (gris), MesoTermófitos (M-T) y cultivos, Aportes detríticos (deducido a partir del ACP de los datos de geoquímica elemental de alta resolución); comparados con la radiación solar en el hemisferio norte (Bard et al., 2000), las variaciones en el nivel de Estanya deducidas por (Riera et al., 2004), escala de eventos humanos locales en la región y principales fases climáticas de este período: PCM (Período Cálido Medieval), PEH (Pequeña Edad de Hielo). Leyenda de facies: A. Alternancia de limos grises y negros, masivos con materia orgánica; B. Limos versicolores finamente laminados, alternando: arcillas grises masivas, láminas marrones oscuras, masivas, ricas en materia orgánica y limos grises-marrones masivos; C. Limos grises oscuros y marrones laminados con materia orgánica; D. Arcillas limosas negras, masivas a débilmente laminadas; E. Alternancia de sapropel marrón, masivo a débilmente laminado con yeso nodular y en láminas blancas a amarillas con limos grises-oscuros, masivos con bioturbación y restos vegetales

Figure 5. *Synthesis of the paleoenvironmental record of Estanya for the last 800 years. From bottom to top: sedimentary units, sedimentary facies, carbonate and gypsum content (inferred from PCA analyses of high resolution geochemistry data set), organic matter isotopes  $\delta^{13}C_{org}$ , biogenic silica (BSi), pollen content in total hydrophytes (HH, black) and aquatic (grey), mesothermophilous (M-T) and cultivars, classic input (inferred from PCA analyses of high resolution geochemistry data set). Reconstructions are compared with solar radiation in the Northern hemisphere (Bard et al., 2000), Estanya lake level changes interpreted by Riera et al., (2004), local and regional human events and main climate phases: PCM (Medieval Warm Period), PEH (Little Ice Age). Facies legend: A. Grey and black silts, massive with organic matter; B. Variegated finely laminated silts with massive grey clays, dark brown, massive, organic-matter rich and massive grey-brown silts; C. Dark grey and brown, laminated, organic matter rich silts; D. Brown, massive to faintly laminated sapropels and nodular and laminated gypsum, with some dark grey silts with plant remains and bioturbation textures*

El Lago de Estanya alcanzó su máximo nivel a lo largo del siglo XIX, cuando se depositaron facies laminadas clásticas y orgánicas, en ambientes de lago profundo, con períodos prolongados de mero-mixis. Esta etapa coincide con la máxima expansión agrícola en la zona y la última fase fría de la PEH. En Zoñar, a finales del siglo XIX, se depositan de nuevo facies laminadas, aunque el nivel del lago no se considera tan elevado como durante el PHIR, ya las diatomeas predominantes son bentónicas y se desarrollan algunos niveles de tapetes algales (Martín-Puertas *et al.*, 2008a). La alternancia de fases de anoxia y condiciones óxicas en el fondo del lago queda marcada por el índice U/Th (Figura 4) (Martín-Puertas *et al.*, 2008b).

La coherencia entre períodos con un balance hídrico más positivo y fases de menor actividad solar (Bard *et al.*, 2000) sugieren un control fundamental de la radiación solar en las fluctuaciones hidrológicas de la laguna de Estanya y Zoñar. Además, la coincidencia de estas fases con cambios climáticos regionales o globales (Luterbacher *et al.*, 2005; Denton y Broecker, 2008) indica un importante control climático de la hidrología de estos lagos.

A lo largo del siglo XX se observa un ligera reducción en el volumen del lago de Estanya, tal y como demuestra la pérdida de laminación en los sedimentos, el aumento en la producción de carbonatos, paralelo al descenso en la productividad orgánica y al aumento de algas carófitas, cuya presencia se incrementa notablemente durante los últimos 40 años (Riera *et al.*, 2004). Este período coincide con el descenso de las precipitaciones en la zona (Saz Sánchez, 2003), el ascenso generalizado de las temperaturas (Mann y Jones, 2003) y el abandono de tierras de cultivo (López-Vicente, 2007). En Zoñar durante los últimos 50 años se incrementa la tasa de sedimentación y la sedimentación de facies masivas. La mecanización de las prácticas agrícolas y la intensificación de las mismas durante el último siglo son la principal causa del incremento en el aporte detrítico a la laguna (Valero- Garcés *et al.*, 2006).

Tanto en Zoñar como en Estanya, se observa un aumento en las tasas de sedimentación a partir de la Edad Media, asociado principalmente a la conquista del territorio por los cristianos y la implementación de nuevas técnicas agrícolas. El efecto antrópico de un aumento en el transporte de sedimentos a los lagos es uno de los más importantes a tener en cuenta a la hora de gestionar estos ecosistemas. Sin embargo, la variabilidad climática del último milenio también ha tenido un papel importante en el transporte de sedimentos a los lagos kársticos que se superpone en algunos casos al factor antrópico.

El ejemplo de la laguna de Taravilla muestra la evolución de un sistema lacustre kárstico abierto durante los últimos 2000 años (Valero Garcés *et al.*, 2008; Moreno *et al.*, 2008). El estudio multi-proxy, incluyendo análisis sedimentológicos, geoquímicos y palinológicos de cuatro sondeos obtenidos permite obtener una secuencia temporal de las capas de paleoavenidas que ocurrieron durante los últimos 2000 años (Figura 6). Estas capas, caracterizadas por una granulometría granodecreciente, baja susceptibilidad magnética y aumentos simultáneos del contenido en carbonato y en siliciclásticos (Moreno *et al.*, 2008), marcan períodos de intensas lluvias que erosionan material de la cuenca y lo transportan hasta el lago. La datación de dichas capas y la comparación con otros registros similares en España (Benito *et al.*, 2003) indica que fueron mucho más abundantes en la PEH que en el período anterior, el PCM, sugiriendo así que la PEH fue un período con mayor frecuencia de avenidas. El análisis polínico, muestra un descenso del manejo antrópico del territorio durante esta época, de manera que la causa de la mayor frecuencia e intensidad de las avenidas no fue un aumento del aprovechamiento del bosque durante los siglos XV- XIX, sino un aumento de las precipitaciones capaces de generar avenidas en la cuenca. Además, observando la correlación con los períodos de máxima radiación solar (mayor número de manchas solares) se deduce que hay una relación entre la producción de eventos extremos de precipitaciones, en esta zona de la península Ibérica asociadas a índices negativos de la Oscilación del Atlántico Norte y la intensidad solar.

### Implicaciones para la gestión

A partir del tratado intergubernamental firmado en Ramsar (Irán) en 1971, en el que se establece la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y uso racional de los humedales y sus recursos, los gobiernos y la comunidad científica se han esforzado en la conservación y gestión de estos ecosistemas. El efectivo manejo de los sistemas acuáticos garantiza la sostenibilidad de los recursos hídricos en el futuro y la conservación de estos ecosistemas de especial significado en áreas mediterráneas. Para ello, siguiendo las directrices de los Proyectos Life de la Unión Europea (<http://ec.europa.eu/environment/life/index.htm>), es preciso atender a cuatro cuestiones fundamentales: i) conocimiento de las condiciones actuales; ii) comprensión de la respuesta del sistema a la variabilidad natural y antrópica de las condiciones ambientales tanto de corta como de larga duración; iii)

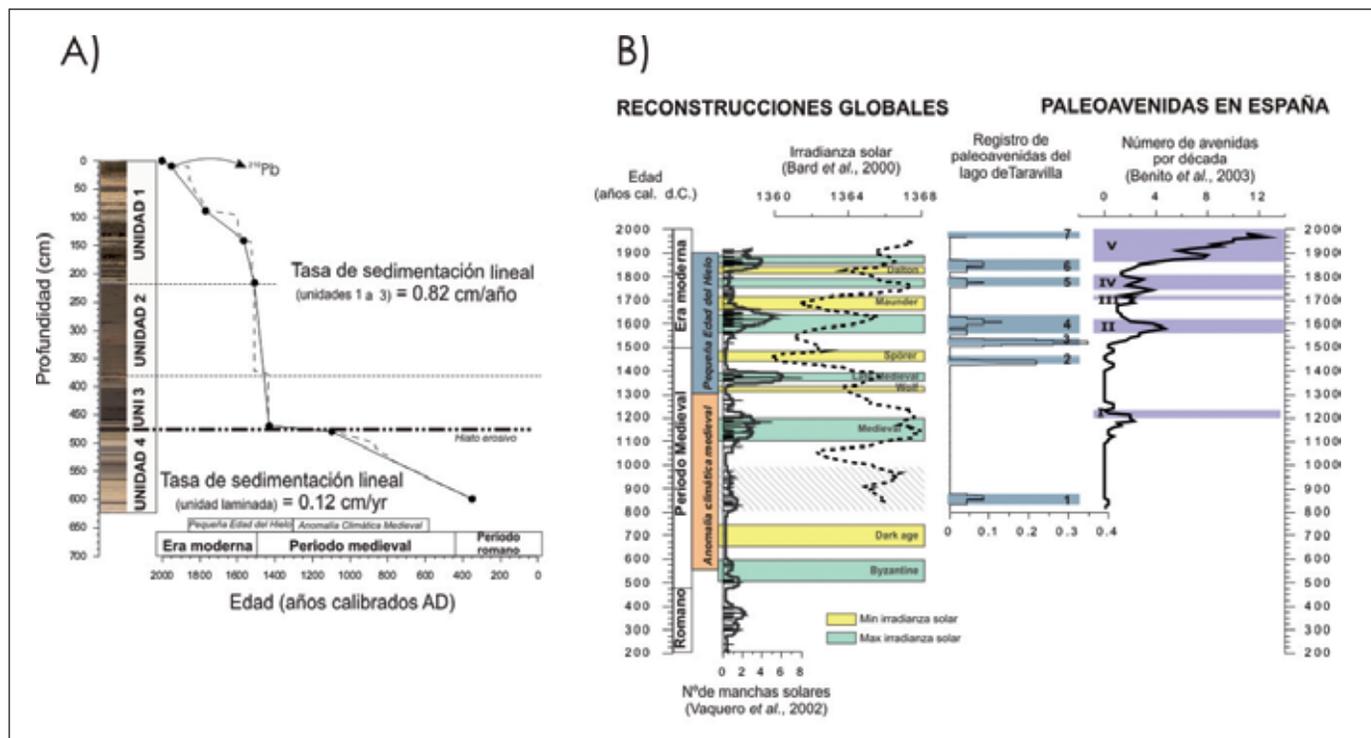


Figura 6. A. Modelo de edad de la secuencia sedimentaria recuperada en el Lago de Taravilla a partir de dataciones de  $^{14}\text{C}$  y de  $^{210}\text{Pb}$ . B. Comparación durante los últimos 2000 años de la radiación solar (representada aquí por el número de manchas solares de Vaquero *et al.*, 2002 y por la reconstrucción realizada por Bard *et al.*, 2000 a partir de isótopos de  $^{14}\text{C}$  y de  $^{10}\text{Be}$  con los resultados de la frecuencia de paleoavenidas obtenidos en el Lago de Taravilla y en el río Tajo (Benito *et al.*, 2003)  
 Figure 6. A. Age model based on  $^{14}\text{C}$  and  $^{210}\text{Pb}$  dates for the Taravilla sequence. B. Comparison of the last 2000 years of solar radiation (represented by the sun-spot numbers from Vaquero *et al.*, 2002 and by  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$  production from Bard *et al.*, 2000) and with flood frequency deduced from Taravilla Lake and Tájus River records (Benito *et al.*, 2003)

identificación de eventos extremos, tanto naturales como antrópicos en los que el sistema pudo haber experimentado cambios dramáticos (incendios, vertidos contaminantes, drenajes, etc.); y iv) predicción de los posibles cambios que el sistema pueda sufrir en el futuro.

Los registros de los tres lagos estudiados nos muestran una sucesión de cambios limnológicos (aportes de sedimentos, ambientes de depósito) e hidrológicos (períodos secos y húmedos) que siguen un patrón climático coherente con otros registros Mediterráneos. En Estanya las principales fases de depósito asociadas a cambios en la salinidad y en el nivel del lago, reflejan la transición del periodo glacial a la deglaciación, el comienzo del Holoceno y numerosas fluctuaciones a escala de milenios y siglos dentro de estos periodos. El último milenio está caracterizado por un aumento notable del nivel medio del lago y un aumento de las tasas de sedimentación, probablemente asociadas al uso intensivo del suelo tras la conquista del territorio por parte del Reino de Aragón (siglo XIII). En Zoñar, los cambios durante los

últimos 3000 años se corresponden con cambios climáticos globales (Mayewski *et al.* 2004). En Taravilla, se ha demostrado un control climático de las variaciones en la tasa de sedimentación. En todos los registros se han identificado las fluctuaciones climáticas del último milenio como el PCM y la PEH. El carácter laminado anual de la sedimentación en Zoñar durante el Periodo Húmedo Ibero - Romano ha permitido identificar ciclicidades de 60 y 20 años, similares a las variaciones en la Oscilación del Atlántico Norte reciente, que es el principal factor de control de las precipitaciones invernales en Europa y el Mediterráneo Occidental (Hurrell, 1995).

La comparación de la evolución de los tres sistemas kársticos durante los últimos milenios muestra la distinta sensibilidad de cada uno a los factores climáticos y antrópicos (Figura 7). El impacto de los periodos secos en la hidrología de los lagos (por ejemplo, durante el tercer milenio antes de nuestra era y durante el PCM) es mas evidente en Zoñar y Estanya. El comienzo de la PEH queda bien caracterizado en los tres sistemas y es resaltable que, a pesar de que

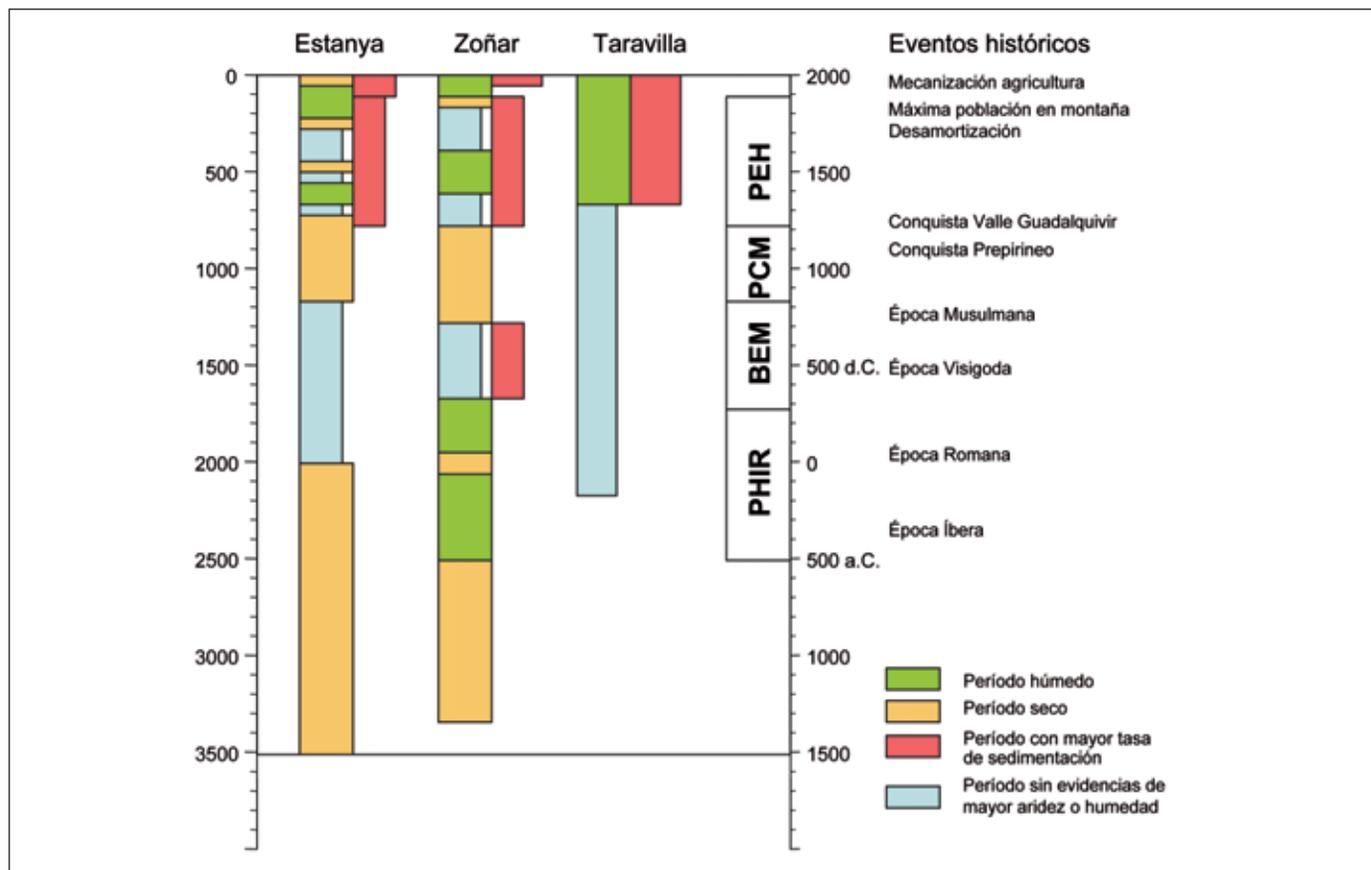


Figura 7. Principales fases húmedas y áridas reconstruidas en los tres lagos estudiados y periodos de mayor aporte de sedimentos clásticos durante los últimos 3000 años : PCM (Período Cálido Medieval), PEH (Pequeña Edad del Hielo), BEM (Baja Edad Media), PHIR (Período Húmedo Ibero Romano)

Figure 7. Main humid and arid phases reconstructed in the three studied lakes and periods of increased clastic sediment delivery to the lakes during the last 3000 years: PCM Medieval Warm Period), PEH (Little Ice Age), BEM (Low Medieval Age), PHIR (Iberian Roman Humid Period)

los modelos cronológicos son mejorables, en ambas secuencias aparecen periodos húmedos al comienzo de la PEH y al final. Por otro lado, tanto el clima como la actividad humana están en continua interacción durante el Holoceno tardío, más aún cuando el clima ha influido en el desarrollo de las actividades humanas. El impacto antrópico, en particular en cuanto al aumento de las tasas de sedimentación en los lagos es muy notable durante el último milenio. Los periodos de mayor presión humana en la región de Zoñar han sido el periodo Ibero, el Imperio Romano, y a partir de la conquista cristiana del valle del Guadalquivir hasta la actualidad, agudizándose durante el último siglo. El polen de olivo marca máximos durante la época íbero-romana, la visigoda y una tendencia creciente desde la Edad Media. Tras el PCM y la conquista cristiana (s. XIII) se produjo un cambio en las prácticas agrícolas que provocó un aumento en el cultivo de olivo y en las tasas de erosión en la cuenca. A

partir de entonces, el incremento de olivo es paralelo a la mayor presencia de facies masivas. Durante el último siglo, la mecanización de las prácticas agrícolas en los alrededores de la laguna junto con el crecimiento de las poblaciones colindantes, provocó una fuerte influencia antrópica sobre el ciclo hidrológico de la laguna (descenso de los niveles hasta 1980) y sedimentario (aumento de los aportes clásticos) que ha descendido a partir de la declaración de la laguna como espacio protegido.

En el caso de la montaña aragonesa, el impacto humano se intensificó a partir de la conquista cristiana del territorio y tuvo su máximo durante el final del siglo XIX y el comienzo del XX (Riera et al., 2004). La presión antrópica sobre las cuencas de recepción de las lagunas del pre-pirineo ha descendido durante la segunda mitad del siglo pasado debido al éxodo rural. En la cuenca alta del río Tajo (Cordillera Ibérica) donde se localiza la laguna de Taravilla, la deforesta-

ción no parece haber sido significativa en los últimos siglos y su impacto hidrológico parece más reducido.

El impacto humano sobre los ecosistemas lacustres se ha intensificado durante el último milenio. Las estrategias de gestión han de tener en cuenta las diferentes causas del aumento de las tasas de sedimentación en los lagos. La conquista del territorio por parte de los cristianos en la Baja Edad Media y los consiguientes cambios en el uso del suelo, la desamortización durante el siglo XIX y la mecanización de la agricultura durante el pasado siglo han tenido un gran impacto en Zoñar y Estanya. La conservación, restauración y protección de estas lagunas ha de tener los cambios históricos en la dinámica de estos sistemas provocados por el uso agrícola de sus cuencas vertientes. En el caso de Taravilla, dada su situación geográfica y la escasa actividad ganadera y agrícola en su cuenca, el aumento de la sedimentación clástica y el consiguiente mayor desarrollo de las áreas palustres se ha debido a un aumento de la actividad aluvial durante la PEH.

Los estudios paleolimnológicos suponen una herramienta útil que aporta información sobre la ecología, hidrología, dinámica sedimentaria y comportamiento del sistema lacustre en épocas pasadas (décadas, siglos y milenios), que de otra manera serían imposibles de obtener. Así pues, la paleolimnología ha de constituir un elemento fundamental en las estrategias de gestión. Por otra parte, los registros sedimentarios lacustres tienen un gran valor paleoclimático ya que poseen una alta resolución (décadas y años) debido a la rápida respuesta de los lagos a los cambios externos y la alta tasa de sedimentación. Además, suelen ser registros continuos y permiten la reconstrucción de eventos climático-históricos. La complejidad de los estudios paleolimnológicos recae en que cada lago es un sistema diferenciado de los demás, que está fuertemente influenciado por factores externos del entorno, tales como el tipo y composición de la cuenca, tectónica, vegetación, biota acuática e influencia humana. Para interpretar adecuadamente el registro sedimentario, en paleolimnología se debe utilizar una estrategia de estudio basada en el análisis de un conjunto de indicadores de diversa naturaleza (sedimentaria, mineralógica, geoquímica, biológica, y físico-química) sensibles a los cambios ambientales.

## Conclusiones

El carácter topográficamente cerrado de las cuencas de recepción, la morfología de las cubetas en las que se sitúan los lagos kársticos con una elevada relación

profundidad / superficie y la estrecha conexión con los acuíferos locales y regionales, confiere a los lagos de origen kárstico una elevada sensibilidad a las fluctuaciones en el nivel hidrológico. El estudio paleolimnológico de sondeos sedimentarios en tres ejemplos españoles muestra la gran variabilidad de ambientes de depósito que se desarrollaron en estos sistemas lacustres durante el último ciclo glacial, ligados a cambios en el nivel de los lagos, la química y las condiciones de mezcla de las aguas y otros parámetros limnológicos. Los cambios climáticos a la escala de milenios desde el último máximo glacial a la escala de décadas han sido responsables de esta gran variabilidad sedimentológica e hidrológica. El impacto de las actividades humanas en las cuencas de recepción ha sido perceptible desde la época íbero-romana, pero especialmente a partir de la Edad Media, con un claro aumento de las tasas de sedimentación en los lagos.

Las secuencias lacustres contienen detallados archivos de cambio global en el pasado. Estos datos aportados por los estudios paleolimnológicos son imprescindibles para conocer la dinámica del sistema y poder implementar políticas de conservación y gestión de estos espacios naturales y de los recursos hidrológicos y ecológicos que sustentan.

## Agradecimientos

Esta investigación se ha financiado con los proyectos LIMNOCAL (CGL2006-13327-C04-01) y GRACCIE (CSD2007-00067); concedidos por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (ICYT); y a través del proyecto multidisciplinar PM073/2007, concedido por la Diputación General de Aragón (DGA). Los comentarios y las revisiones de un revisor anónimo y de Rosa Mediavilla han contribuido a mejorar la calidad de este manuscrito.

## Referencias

- Alonso, M. 1998. Las lagunas de la España peninsular. *Limnetica* 15: 1-176.
- Álvarez Cobelas, M., Cirujano, S., 2007. *Ecología acuática y sociedad de las Lagunas de Ruidera*. Biblioteca de Ciencias. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C.), Madrid, Spain, 414 pp.
- Álvarez Cobelas, M., J. Catalán y D. García de Jalón. 2005. Impactos del cambio climático sobre los ecosistemas acuáticos continentales. En: Moreno, J. M. (coord.), *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de España, Madrid.
- Álvarez Cobelas, M. 2006. Groundwater mediated limnology in Spain. *Limnetica* 25, 107-121.

- Ávila, A., Burrell, J.L., Domingo, A., Fernández, E., Godall, J., Llopart, J.M., 1984. Limnología del Lago Grande de Estanya (Huesca). *Oecologia aquatica*, 7, 3-24.
- Bard, E., Raisbeck, G., Yiou, F., Jouzel, J., 2000. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *Tellus B*, 52(3), 985-992.
- Battarbee, R., 1999. The importance of palaeolimnology to lake restoration. *Hydrobiologia*, 395-396(0), 149-159.
- Bayarri-Borja, J., 2005. *Origen de les aigües del Llac de Montcortès (Baix Pallars, Lleida)*. Tesis de máster, Universitat de Barcelona, Barcelona, 68 pp.
- Benito, G., Díez-Herrero, A. and Fernández de Villalta, M., 2003. Magnitude and frequency of flooding in the Tagus basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 58: 171-192.
- Bennion, H., Fluin, J., Simpson, G.L., 2004. Assessing eutrophication and reference conditions for Scottish freshwater lochs using subfossil diatoms. *Journal of Applied Ecology*, 41(1), 124-138.
- Binford, M.W., Brenner, M., Whitmore, T.J., Higuera-Gundy, A., Deevey, E.S., Leyden, B., 1987. Ecosystems, paleoecology and human disturbance in subtropical and tropical America. *Quaternary Science Reviews*, 6(2), 115-128.
- Borja, C. y F. Borja. 2002. Contribución a la clasificación genética de los humedales de Andalucía. Tipos genéticos y complejos palustres. En: *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del tercer milenio*. A. Pérez; J. Vegas y M.J. Machado (eds.). IGME. Madrid, pp. 25-30.
- Brauer, A. y Casanova, J. 2001. Chronology and depositional processes of the laminated sediment record from Lac d'Annecy, Frech Alp. *Journal of Paleolimnology* 25: 163-177.
- Cacho, I., Grimalt, J.O., Pelejero, C., Canals, M., Sierro, F.J., Flores, J.A., Shackleton, N., 1999. Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea paleotemperatures. *Paleoceanography*, 14, 698-705.
- Canals, M., Got, H., Julia, R., Serra, J., 1990. Solution-collapse depressions and suspensates in the limnocratic lake of Banyoles (NE Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(3), 243-254.
- Caroli, I. y Caldara, M. 2007. Vegetation history of Lago Battaglia (eastern Gargano coast, Apulia, Italy) during the middle-late Holocene. *Vegetation History and Archaeobotany* 16, 317-327.
- Carrión, J.S. 2002. Patterns and processes of Late Quaternary environmental change in a montane region of southwestern Europe. *Quaternary Science Reviews* 21, 2047-2066.
- Casado de Otaola, S. y Montes del Olmo C. 1995. *Guía de los lagos y humedales de España*. J. M Reyero Editor, Madrid, 255 pp.
- Chapa Brunet, T. 1998. Iron Age Iberian Sculptures as Territorial Markers: The Córdoba Example (Andalusia). *European Journal of Archaeology* 1, 71-90.
- Cohen, A.S. 2003. *Paleolimnology. The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press. 500 pp.
- Crowley, T.J., Lowery, T.S. 2000. How Warm Was the Medieval Warm Period? *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(1), 51-54.
- Denton, G.H., Broecker, W.S., 2008. Wobbly ocean conveyor circulation during the Holocene? *Quaternary Science Reviews*, 27(21-22), 1939-1950.
- DGOH. 1996. *Lagos y humedales de España*. En Montes, C. (coord). INIMA. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. MOPTMA
- Díaz, P., Guerrero, M., Alcorlo, P., Baltanás, A., Florin, M., Montes, C. 1998. Anthropogenic perturbations to the trophic structure in a permanent hypersaline shallow lake: La Salada de Chiprana (north-eastern Spain). *International Journal of Salt Lake Research*, 7(3), 187-210.
- Durán, J.J.; A.García de Domingo, J.A. López-Geta y J.M Soria. 2004. Caracterización geológica e hidrogeológica de los humedales españoles de importancia internacional, *XXXIII Congress of IAH - Conference on Groundwater Flow Understanding*. Zacatecas, Mexico
- Enadimsa. 1989. *Estudio hidrogeológico de la Laguna de Zoñar*. Junta de Andalucía. Agencia de Medio Ambiente, Sevilla.
- Frigola, J., Moreno, A., Cacho, I., Canals, M., Sierro, F.J., Flores, J.A., Grimalt, J.O., 2008. Evidence of abrupt changes in Western Mediterranean Deep Water circulation during the last 50 kyr: A high-resolution marine record from the Balearic Sea. *Quaternary International*, 181(1), 88-104.
- Gonzalez-Samperiz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Morellon, M., Navas, A., Machin, J., Delgado-Huertas, A. 2008. Vegetation changes and hydrological fluctuations in the Central Ebro Basin (NE Spain) since the Late Glacial period: Saline lake records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(2-3), 157-181.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T y Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research* 66, 38-52.
- Hakanson, L. y Jansson, M. 1983. *Principles of Lake sedimentology*. Springer-Verlag. Berlín. 316 pp.
- Hurrell, J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676-679.
- Kelts, K. and Hsu, K. J. 1978. Freshwater carbonate sedimentation. In: Lerman, A. ed., *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. New York, Springer-Verlag, 295-323.
- Lacarra, J.M., 1972. *Aragón en el pasado, 1435*. Austral, Madrid.
- Last, W.M., Smol, J.P. (eds.), 2001. *Tracking Environmental Change using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research Series 1 - 4*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, U.S.A.
- López-Vicente, M., 2007. *Erosión y redistribución del suelo en agroecosistemas mediterráneos: Modelización predictiva mediante SIG y validación con <sup>137</sup>Cs (Cuenca de Estaña, Pirineo Central)*. PhD Thesis, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 212 pp.
- Luterbacher, J., Xoplaki, E., Casty, C., Wanner, H., Pauling, A., Küttel, M., Rutishauser, T., Brönnimann, S., Fischer, E., Fleitmann, D., González-Rouco, F.J., García-Herrera,

- R., Barriendos, M., Rodrigo, F., Gonzalez-Hidalgo, J.C., Saz, M.A., Gimeno, L., Ribera, P., Brunet, M., Paeth, H., Rimbu, N., Felis, T., Jacobeit, J., Dünkeloh, A., Zorita, E., Guiot, J., Türkeş, M., Alcoforado, M.J., Trigo, R., Wheeler, D., Tett, S., Mann, M.E., Touchan, R., Shindell, D.T., Silenzi, S., Montagna, P., Camuffo, D., Mariotti, A., Nanni, T., Brunetti, M., Maugeri, M., De Zerefos, C., Zolt, S., Lionello, P. 2005. Mediterranean Climate Variability Over The Last Centuries: A Review. In: P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo (Editors), *The Mediterranean Climate: an overview of the main characteristics and issues*. Elsevier, pp. 128.
- Macklin, M. G., Benito, G., Gregory, K. J., Johnstone, E., Lewin, J., Michczy ska, D. J., Soja, R., Starkel, L., Thorndycraft, V. R. 2006. Past hydrological events reflected in the Holocene fluvial record of Europe. *Catena* 66, 145-154.
- Magny, M. 2004. Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. *Quaternary International* 113, 65-79.
- Magny, M., de Beaulieu, J. L., Drescher-Schneider, R., Vannière, B., Walter-Simonnet, A.-V., Miras, Y., Millet, L., Bossuet, G., Peyron, O., Brugiapaglia, E., Leroux, A. 2007. Holocene climate changes in the central Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lake Accesa (Tuscany, Italy). *Quaternary Science Reviews* 26, 1736-1758.
- Mann, M.E., Jones, P.D. 2003. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, 30(15), 1820, doi:10.1029/2003GL017814
- Manzano, M., Borja, F. y Montes, C. 2002. Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación al caso de los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3): 313-330
- Martín-Puertas C, Valero-Garcés BL, Brauer A, Mata MP, Delgado-Huertas A, Dulsky P. 2009. Timing and structure of The Post-Bronze Iberian-Roman Humid Period (2.6-1.6 cal yr. BP) based on the Zoñar Lake varve record (Andalucía, Southern Spain). *Quaternary Research* 71, 108-120 doi 10.1016/j.yqres.2008.10.004
- Martín-Puertas, C., Valero-Garcés, B.L., Mata, M.P., González-Sampérez, P., Bao, Roberto., Moreno, A., Stefanova, V. 2008a. Arid and humid phases in the Southern Spain during the Last 4000 years: The Zoñar Lake Record, Córdoba. *The Holocene* 18, 907-921.
- Martín-Puertas, C., Mata, M.P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Martínez-Ruiz, F., González-Sampérez, P., Morellón, M., Rico, M., Corella, J.P. y González-Barrios, A.J. 2008b. Características geoquímicas del registro sedimentario de un lago mediterráneo: evolución paleoambiental de la Laguna de Zoñar (Córdoba) *Geotemas* 10: 1475-1478.
- Mayewski, P. A., Rohling, E. E., Stager, J. C., Karlén, W., Maasch, K. A., Meeker, L. D., Meyerson, E. A., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R. R., Steig, E. J. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62: 243-255.
- Modamio, X., Pérez, V., Samarra, F. 1988. Limnología del lago de Montcortés (ciclo 1978-79) (Pallars Jussá, Lleida). *Oecología acuática*, 9, 9-17.
- Montes, C.; G. Oliver; F. Molina y J. Cobos (Eds.). 1995. *Bases ecológicas para la restauración de humedales en la cuenca mediterránea*. DGOH. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla, 348 pp.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Anselmetti, F., Ariztegui, D., Schnellmann, M., Moreno, A., Mata, P., Rico, M., and Corella, J. P. 2009. Late Quaternary deposition and facies model for karstic Lake Estanya (North-eastern Spain). *Sedimentology*, 56, 1505-1534.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B. L., González-Samperiz, P., Vegas-Vilarrubia, T., Rubio, E., Rieradevall, M., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Romero, O., Engstrom, D. R., López-Vicente, M., Navas, A. and Soto, J. (en prensa) Climate and human signatures during the Medieval Norm Period and the Little Ice Age in the Spanish Pre-Pyrenees: the lake Estanya record. *Journal of paleoclimatology*.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Moreno, A., González-Sampérez, P., Mata, P., Romero, O., Maestro, M., Navas, A. 2007. Holocene palaeohydrology and climate variability in Northeastern Spain: The sedimentary record of Lake Estanya (Pre-Pyrenean range). *Quaternary International* 181: 15-31.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Vegas, T., González-Sampérez, P., Romero, O., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, M., and Corella, J. P. 2009. Late glacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: the Lake Estanya record (NE Spain). *Quaternary Science Reviews*, 28: 2582-2599.
- Moreno, A., Valero-Garcés, B.L., González-Sampérez, P. and Rico, M. 2008. Flood response to rainfall variability during the last 2000 years inferred from the Taravilla Lake record (Central Iberian Range, Spain). *Journal of Paleolimnology*, 40: 943-961.
- Moreno, A., Valero-Garcés, B.L., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez, M.J., Mata, P., Navas, A., González-Sampérez, P., Stoll, H., Farias, P., Morellón, M., Corella, J.P., Rico, M., (en prensa). The last deglaciation in the Picos de Europa National Park (Cantabrian Mountains, Northern Spain). *Journal of Quaternary Science*, DOI: 10.10021 jqs.1265.
- Moya, J.L. 1986. Análisis del hidrograma del manantial de Zoñar. *Oxyura* 3, 29-33.
- Ordóñez, S., Gonzalez Martin, J.A., Garcia del Cura, M.A., Pedley, H.M. 2005. Temperate and semi-arid tufas in the Pleistocene to Recent fluvial barrage system in the Mediterranean area: The Ruidera Lakes Natural Park (Central Spain). *Geomorphology*, 69(1-4), 332-350.
- Osborn, T.J., Briffa, K.R. 2006. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years. *Science*, 311, 841-844.
- Rasmussen, S.O., Seierstad, I.K., Andersen, K.K., Bigler, M., Dahl-Jensen, D., Johnsen, S.J. 2008. Synchronization of the NGRIP, GRIP, and GISP2 ice cores across MIS 2 and palaeoclimatic implications. *Quaternary Science Reviews*, 27(1-2), 18-28.

- Reed, J.M., Stevenson, A.C., Juggins, S. 2001. A multi-proxy record of Holocene climatic change in southwestern Spain: the Laguna de Medina, Cádiz. *Holocene* 11: 707-719.
- Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C. B., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J., and Weyhenmeyer, C. E. 2004. IntCal04 Terrestrial Radiocarbon Age Calibration, 0–26 Cal Kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1029-1058.
- Rico, E., Chicote, A., González, M.E., Montes, C. 1995. Batimetría y análisis morfométrico del lago de Arreo (N. España). *Limnética*, 1(11), 55-58.
- Riera, S., Wansard, R., Julià, R., 2004. 2000-year environmental history of a karstic lake in the Mediterranean Pre-Pyrenees: the Estanya lakes (Spain). *Catena*, 55, 293-324.
- Romero Viana, L. 2007. *Paleolimnological study in two karstic lakes: climate signal in varved sediment and phototrophic organisms variability*, Universitat de València, València (España), 174 pp.
- Romero-Viana, L., Julià, R., Camacho, A., Vicente, E., Miracle, M.R. 2008. Climate signal in varve thickness: Lake La Cruz (Spain), a case study. *Journal of Paleolimnology* 40, 703-714.
- Saz Sánchez, M.A. 2003. *Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV. Estudio Dendroclimático*. Serie Investigación. Publicaciones del Consejo de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, Spain.
- Schnurrenberger, D.W., Russell, J.M., Kelt, K. 2003. Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology* 29, 141-154.
- Seager, R., Graham, N., Herweijer, C., Gordon, A.L., Kushnir, Y., Cook, E. 2007. Blueprints for Medieval hydroclimate. *Quaternary Science Reviews*, 26(19-21), 2322-2336.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. 1993. Extended 14C data base and revised CALIB 3.0 <sup>14</sup>C age calibration program. *Radiocarbon* 35, 215-230.
- Valero Garcés, B.L., Moreno, A., Navas, A., Mata, P., Machín, J., Delgado Huertas, A., González Sampérez, P., Schwalb, A., Morellón, M., Cheng, H., Edwards, R.L. 2008. The Taravilla lake and tufa deposits (Central Iberian Range, Spain) as palaeohydrological and palaeoclimatic indicators. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(2-3), 136-156.
- Valero Garcés, B. L., González-Sampérez, P., Navas, A., Machín, J., Mata, P., Delgado-Huertas, A., Bao, R., Moreno, A., Carrión, J. S., Schwalb, A., González-Barrios, A. 2006. Human impact since medieval times and recent ecological restoration in a Mediterranean lake: The Laguna Zoñar, southern Spain. *Journal of Paleolimnology* 35, 441-465.
- Vaquero, J.M., Gallego, M.C. and García, J.A. 2002. A 250-year cycle in naked-eye observations of sunspots. *Geophysical Research Letters*, 29(20): doi:10.1029/2002GL014782.
- Vicente, E., Camacho, A., Rodrigo, M.A. 1993. Morphometry and physico-chemistry of the crenogenic meromictic Lake 'El Tobar' (Spain). *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 25, 698-704
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology*. Academic Press. San Diego, CA. 1006 pp.

Recibido: enero 2009

Revisado: abril 2009

Aceptado: mayo 2009

Publicado: octubre 2009