



Métodos de datación en sedimentos cuaternarios con laminación anual: Ejemplos de la Península Ibérica

Dating techniques in Quaternary annually-laminated sediments. Examples from the Iberian Peninsula

Corella, J.P. ⁽¹⁾; Martín-Puertas, C. ⁽²⁾

(1) Departamento de Medioambiente, CIEMAT. Av. Complutense 40, 28040 Madrid, España. JuanPablo.Corella@ciemat.es

(2) Department of Geography, Royal Holloway University of London, Egham, Surrey, TW20 0EX, UK. Celia.MartinPuertas@rhul.ac.uk

Resumen

Las secuencias sedimentarias con laminación anual (varvas) producen modelos cronológicos independientes de alta resolución (e.g. anual o incluso estacional), basados en el conteo de láminas, con una incertidumbre de edad menor al 5%. Durante las últimas décadas se han datado más de doscientas secuencias varvadas en diferentes sistemas marinos y lacustres, ubicadas fundamentalmente en el hemisferio norte. La mayor parte de las secuencias varvadas cubren los últimos siglos o milenios, siendo mucho más escasos los registros que abarcan cronologías anteriores al Holoceno. Hasta la fecha, se han identificado cinco registros varvados cuaternarios en la Península Ibérica (restringidos al Holoceno tardío), ubicados en sistemas kársticos de zonas mediterráneas. Cuando la laminación no es continua desde el techo del registro, el conteo de varvas debe validarse con otras técnicas de datación independiente y compararse con eventos históricos (cronomarcadores) para asignar una edad calendario a la secuencia varvada y alcanzar modelos precisos y fiables de profundidad-edad, sirviendo de base para llevar a cabo reconstrucciones paleoambientales de alta resolución temporal.

Palabras clave: varvas, sedimentos laminados, Península Ibérica, lagos, cronología.

Abstract

Annually-laminated (varved) sediments provide independent, high-resolution time scales based on annual-layer counts with age uncertainties lower than 5%. More than two hundred varved chronologies have been published during the last decades in both marine and lacustrine environments, mainly located in the Northern Hemisphere. Most of the varved chronologies cover the last centuries or millennia, and only a few of them



go back beyond the Holocene period. In the Iberian Peninsula, five Quaternary varved sequences have been identified, restricted to the Late Holocene. They are located in karstic systems from mediterranean regions and present biogenic varves. Floating varve chronologies (i.e., the laminations are not preserved from the top of the record) must be validated either by using independent dating techniques or known historical events as isochrones to link the varve chronology to the calendar time scale. Once calibrated, varve chronologies allow precise and reliable age-depth models, serving to develop detailed reconstructions of past environmental changes at high temporal resolution.

Key words: varves, laminated sediments, Iberian Peninsula, lakes, chronology.

1. Introducción

Los sedimentos laminados, ampliamente conocidos como “varvas”, corresponden a registros sedimentarios en ambientes lacustres y marinos con un ciclo de deposición anual (Zolitschka 2007). La formación y composición de varvas está controlada por diversos factores y procesos climatológicos, hidrológicos, limnológicos y biológicos. El desarrollo de varvas suele ocurrir en medios anóxicos que impiden la bioturbación de los sedimentos que podría alterar, o incluso hacer desaparecer, la laminación original. Los registros varvados están formados por un conjunto de láminas depositadas durante las diferentes estaciones del año, por lo que una marcada estacionalidad suele favorecer la formación de este tipo de depósitos. Las laminaciones con carácter anual se pueden agrupar en tres tipos diferentes dependiendo de su composición (Fig. 1): i) Varvas biogénicas, cuya formación está controlada fundamentalmente por procesos biogeoquímicos que ocurren en lagos eutróficos y suelen estar caracterizadas por la presencia de láminas de diatomeas, materia orgánica y/o carbonatos autigénicos; ii) Varvas clásticas, compuestas fundamentalmente por láminas detríticas de diferentes tamaños de grano que responden a diferentes tipos de aportes; iii) Varvas evaporíticas, controladas por diferentes procesos físico-químicos que modulan la precipitación de minerales evaporíticos tales como carbonatos y sulfatos.

En el caso de las cuencas lacustres, la formación de los diferentes tipos de varvas suele estar relacionadas con la región climática donde

se encuentra el lago (Fig. 1). Las varvas biogénicas suelen formarse en regiones templadas y relativamente húmedas (latitudes medias) respondiendo a una estacionalidad marcada por un incremento de la precipitación en invierno, que produce una lámina detrítica, y condiciones más cálidas en verano que favorecen la acumulación de materia orgánica y la formación de láminas de calcita autigénica en respuesta a una mayor productividad en el lago y un aumento de la temperatura. Las varvas clásticas son típicas en climas fríos (latitudes altas o montañosas) donde la laminación anual responde a los ciclos anuales de fenología de la cobertera de hielo en la superficie del sistema acuático. Las varvas evaporíticas son típicas en zonas áridas y semiáridas (latitudes bajas). La laminación suele estar constituida de una lámina detrítica transportada principalmente por acción eólica y una lámina de minerales evaporíticos correspondiente a la estación más cálida cuando la evaporación es el proceso dominante en el lago (Sturm and Lotter, 1995; Zolitschka *et al.*, 2015).

El primer tipo de varvas que se describieron corresponden a las varvas clásticas definidas en sedimentos glaciolacustres en Suecia por el geólogo Gerald De Geer (de Geer 1912). De hecho, la etimología del término varva proviene de la palabra sueca “varv” (“lámina” en castellano). De Geer fue el primero en sugerir el carácter estacional de la deposición de estas varvas, con deposición de láminas limosas durante la época de deshielo, y decantación de láminas de sedimento arcilloso durante la estación fría, cuando el sistema lacustre estaría cubierto por hielo. Este autor fue el

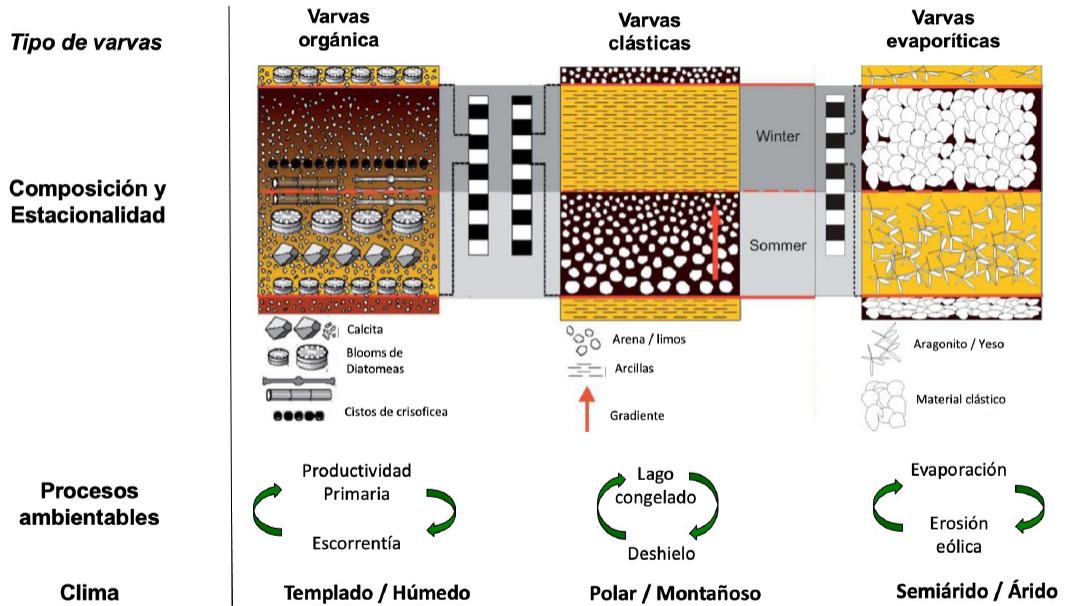


Fig. 1. Modelo deposicional de tres tipos de varvas, su composición general, procesos ambientales y clima. Modificado de Sturm and Lotter (1995).

Fig. 1. Depositional model of three varve types, composition, environmental processes and climate. Modified from Sturm and Lotter (1995).

pionero en el empleo del conteo de varvas como una herramienta cronológica, que utilizó para evaluar la dinámica de retroceso de hielo en Escandinavia. Durante las siguientes décadas, otros sedimentólogos utilizaron esta técnica de datación para obtener cronologías de alta resolución durante el Cuaternario, no siempre de manera satisfactoria. Un ejemplo reseñable data de los años 20, cuando se atribuyó un carácter anual a la deposición rítmica de sedimentos laminados en el Lago Lemán (Suiza). Con el advenimiento de las dataciones radiométricas cuatro décadas más tarde se demostró que esas láminas no respondían a un patrón de deposición estacional. Este ejemplo pone de manifiesto la necesidad de establecer un procedimiento sistemático para obtener cronologías robustas empleando sedimentos laminados. Con este objetivo, se estableció el grupo internacional de trabajo sobre varvas (PAGES Varve Working Group) en el año 2009 con el fin de reunir a la comunidad científica trabajando en sedimentos laminados para promover nuevos desarrollos metodológicos de esta importante herramienta de datación y reconstrucción paleoam-

biental. En el presente trabajo se resumen las principales metodologías y procedimientos para obtener modelos de edad-profundidad en sedimentos varvados, discutiendo los rangos de edad y errores asociados. Por último, profundizaremos en las secuencias varvadas disponibles en la Península Ibérica analizadas hasta el momento actual.

2. Metodología

La datación de sedimentos laminados se basa en un principio simple de conteo del número de láminas y su posterior contraste con otras técnicas de datación independiente para validar el carácter anual de la laminación y vincular el número de varva a una determinada edad. Para obtener cronologías de alta resolución de sedimentos laminados es fundamental, en un primer lugar, entender y comprobar el carácter estacional de la laminación. Para ello, se deben establecer modelos deposicionales conceptuales que permitan entender la naturaleza de las láminas y la ritmicidad de sus ciclos de deposición anual. Si las var-

vas se conservan en la actualidad, lo mejor es realizar un monitoreo del lago e instalar trampas de sedimento que corroboren la estacionalidad de cada sub-lámina. Posteriormente se debe seleccionar la metodología y procedimiento para realizar tanto el conteo de varvas como el cálculo del error asociado. Varias metodologías han sido propuestas por la comunidad científica durante las últimas décadas (Lotter and Lemcke 1999; Zolitschka 2007; Ojala *et al.* 2012; Schimmelmann *et al.* 2016) en base al tipo de varvas, su composición, espesor o estado de preservación.

El trabajo pionero de *de Geer* fue realizado mediante observaciones directas en afloramientos (paleolagos). Sin embargo, en la mayor parte de las ocasiones, estudiamos secuencias cuaternarias localizadas en el subsuelo. Para obtener el material para datar se suelen emplear técnicas de perforación para obtener testigos sedimentarios. Estos testigos se abren longitudinalmente para su posterior análisis sedimentológico. Las varvas de mayor espesor (de escala centimétrica) pueden ser contadas directamente sobre el sedimento fresco. Por el contrario, láminas de menor espesor (escala milimétrica) requieren de observaciones en lámina delgada empleando diferentes tipos de técnicas de microscopía óptica y electrónica. Las láminas delgadas sobre sedimentos no consolidados se obtienen a partir de un procedimiento de consolidación con resina y su posterior pulido. Una vez obtenidas las láminas delgadas se procedería al análisis y caracterización de las diferentes láminas y sub-láminas mediante estudio de microfacies y su posterior conteo empleando el microscopio óptico con diferentes aumentos en función del espesor de las láminas. Para reducir el error humano en el conteo se deben realizar varios conteos, idealmente, por diferentes investigadores. Cada investigador debe contar el número de varvas en cada lámina delgada y hacer un segundo conteo basado en la medida del espesor de cada varva. Las láminas delgadas a lo largo del registro deben estar solapadas, al menos, dos centímetros y se marcan los puntos de correlación entre una lámina delgada y la siguiente

para no perder información cronológica. Por último, se comparan los distintos contajes para calcular el error de contaje y se elige un contaje medio que establecerá el modelo de edad-profundidad.

La reciente implementación de programas informáticos de análisis de imagen, así como la obtención de fotografías de alta resolución de los sondeos estudiados y técnicas de tomografía axial computarizada aplicada a dichos sondeos ha permitido desarrollar una tercera metodología basada en un conteo de varvas automatizado o semiautomatizado empleando técnicas de análisis de imagen en las secuencias laminadas digitalizadas (Francus *et al.*, 2002; Weber *et al.*, 2010, Ebert and Trauth, 2015). Análisis geoquímicos de alta resolución (fundamentalmente la microfluorescencia de rayos X) pueden también resultar muy útil como información adicional para caracterizar las varvas y determinar su edad (Marshall *et al.*, 2012). Esta técnica permite caracterizar la diferente composición elemental de las diferentes láminas que no puedan ser apreciadas mediante técnicas de visu y/o de microscopía porque presentan márgenes difusos y/o graduales, o coloraciones y texturas similares. Sin embargo, es recomendable validar estos métodos de contaje con la observación de los sedimentos en el microscopio, ya que los métodos digitales podrían inducir una sistemática sobre o subestimación del número de varvas (Ojala *et al.*, 2012).

2.1. Tipos de cronología de varvas y determinación de errores asociados al método de datación

La cronología de registros varvados puede ser de dos tipos en función del intervalo de edad y la continuidad del modelo de profundidad que registre la secuencia sedimentaria. De esta manera, una cronología “absoluta” incluiría una deposición de varvas continua hasta el periodo actual. Por el contrario, una cronología “flotante” presentaría intervalos sin varvas, donde no se conservarían los ciclos anuales de deposición de las láminas debido

a cambios en la dinámica sedimentaria y/o limnológica. En este tipo de cronologías se utilizan crono-marcadores relacionados con diferentes eventos históricos y/o ambientales (e.g. terremotos, inundaciones, actividad volcánica que hayan quedado registrados en las secuencias sedimentarias) para anclar la cronología a una escala de tiempo de años de calendario. La comparativa de otros métodos de datación independientes como pueden ser dataciones radiométricas de carbono 14, cesio 137 y/o plomo 210, cambios en la vegetación, tefrocronología o paleomagnetismo permiten validar los modelos cronológicos establecidos mediante el conteo de varvas que permitiría determinar la exactitud y precisión de la cronología de las secuencias datadas en sedimentos laminados. Tradicionalmente, el método más usado es elegir un evento u horizonte cronológico para anclar la cronología varvada asumiendo el rango de incertidumbre de edad asociado al evento / horizonte en concreto como error absoluto asociado a la cronología final (Brauer *et al.*, 2000; Ojala *et al.*, 2012). Normalmente el error asociado al conteo de varvas es mucho menor que la incertidumbre de edad asociada a la datación. Para disminuir esta incertidumbre absoluta, recientemente se aplican métodos estadísticos como modelos bayesianos, los cuales combinan toda posible información cronológica asociada a un registro (e.g. conteo de varvas, horizontes de tefra, dataciones de carbono 14, información sedimentológica) para obtener una mejor aproximación del posible error cronológico (Ramsey *et al.* 1995; Martín-Puertas *et al.*, 2021). Por último, la determinación y cuantificación de los errores asociados a la cronología de varvas en sí para obtener modelos de profundidad-edad robustos se fundamentan en la obtención de conteos replicados en varios sondeos, llevados a cabo, idealmente, por diferentes investigadores (Ojala *et al.* 2012; Żarczyński *et al.*, 2018). El más utilizado es la desviación típica entre los diferentes conteos. Sin embargo, muchas veces, esto no es posible debido a la ausencia de material y/o especialistas en sedimentología de secuencias varvadas.

3. Distribución espacial de secuencias varvadas y rango temporal de aplicación del método

Las secuencias varvadas pueden encontrarse en diferentes ambientes deposicionales, fundamentalmente en sistemas marinos, estuarios y lagos. Las últimas revisiones de registros varvados a escala global muestra una distribución irregular (Ojala *et al.* 2012, Schimmelmann *et al.* 2016, Valero-Garcés y Corella, 2018, Ramisch *et al.* 2020). En la actualidad hay más de 200 sistemas varvados con modelos cronológicos robustos de conteo de varvas. Estos trabajos muestran una distribución espacial muy heterogénea con 52 secuencias varvadas en sistemas marinos (Schimmelmann *et al.* 2016) distribuidas fundamentalmente en el hemisferio norte, mientras que las secuencias varvadas lacustres, se localizan sobre todo en Europa y Norteamérica. Esto no necesariamente significa que no hay varvas en el hemisferio sur, sino que han sido menos estudiadas. Algunos ejemplos de registro varvados en el hemisferio sur pueden ser encontrados en Wolff *et al.* (2011), Bendle *et al.* (2019) y Sear *et al.* (2020) entre otros.

La mayor parte de las secuencias se restringen a la última fase del Holoceno (últimos 2000 años), con numerosos registros con una extensión temporal inferior a los 100 años, debido a que muchos sistemas varvados actuales son de neoformación debido a la eutrofización antrópica durante las últimas décadas. Solamente algunos registros contienen varvas formadas antes del Holoceno (“i. e.” últimos 11 700 años), como es el caso de los registros varvados centroeuropeos de los lagos Holzmaar (Zolitschka *et al.*, 2015) y Meerfelder Maar (Brauer *et al.*, 1998; Martín-Puertas *et al.*, 2012; Lane *et al.*, 2015) que cubren hasta el Último Máximo Glacial, o el excepcional registro de Lago Grande di Monticchio en Italia que tiene un registro de varvas continuo de los últimos 132 000 años (Brauer *et al.*, 2007; Martín-Puertas *et al.*, 2016; Martín-Puertas *et al.*, 2019). Sin embargo, la secuencia varvada de mayor relevancia geocronológica es, posiblemente, la secuencia analizada en el

lago Suigetsu, en Japón. Las varvas en este registro de más de 70 000 años corresponden a los tipos clástico y biogénico. Esta secuencia ha sido analizada por numerosos investigadores de diferentes nacionalidades durante las últimas tres décadas debido, entre otros aspectos, a su gran potencial para proporcionar un modelo de calibración de cronología de radiocarbono terrestre durante el periodo 11 200 - 52 800 años (anterior al límite que proporciona la dendrocronología) (Ramsey *et al.* 2012). Una de las mayores implicaciones que ha conllevado el desarrollo de esta cronología de alta resolución es, entre otras, el poder alcanzar una curva de calibración robusta de radiocarbono durante los últimos 50 000 años, suponiendo un gran avance para toda la comunidad científica trabajando en el Cuaternario.

4. Ejemplos en la Península Ibérica

En la Península Ibérica se han identificado, hasta el momento, cinco registros varvados:

Laguna de Zoñar, lago de Montcortès, laguna de Banyoles, lago de Arreo y lago La Cruz (Valero-Garcés y Corella). Todos ellos están emplazados en diferentes sistemas lacustres de zonas mediterráneas (Fig. 2, Tabla 1), con un clima caracterizado por una marcada estacionalidad que favorece la formación de láminas con un ciclo anual. Todos estos registros se encuentran en cubetas profundas y de pequeñas dimensiones en sistemas kársticos, que favorecen la generación de ambientes anóxicos en el fondo de los lagos, impidiendo la bioturbación y favoreciendo la preservación de sedimentos laminados. Los registros varvados de todos estos sistemas corresponden a varvas biogénicas de tipo calcáreo, caracterizadas por la precipitación de láminas de calcita por la actividad biológica en relación a grandes floraciones algales durante la estación cálida, y la deposición de materia orgánica durante el resto del ciclo anual (Romero-Viana *et al.* 2008, 2011, Martín-Puertas *et al.* 2009, Corella *et al.* 2012, Trapote *et al.* 2018b, Vegas-Vilarrúbia *et al.* 2020). Aunque la tipología de las varvas y su contexto geo-



Fig. 2. Mapa de la Península Ibérica mostrando la ubicación de los diferentes sistemas lacustres cuaternarios con laminación anual datada mediante conteo de varvas.

Fig. 2. Map of the Iberian Peninsula showing the location of the different quaternary lacustrine settings with annual lamination dated using varve counting.

Lago	Coordenadas/ Profundidad	Tipo de cronología	Intervalo temporal	Error asociado	Referencias
Banyoles	42 ° 01' N, 2° 04' E (46 m)	Absoluta	Finales siglo XIX- actualidad	No	<i>Morellón et al., 2015</i>
Arreo	42 ° 46' N, 2°59'O (24 m)	Flotante	1952-1998 AD	No	<i>Corella et al., 2011</i>
La Cruz	39° 59'N; 1° 52'O (21 m)	Absoluta	1573-2010 AD	No	<i>Romero-Viana et al., 2008; 2011</i>
Zoñar	37 ° 29' N, 4° 41'O (14,5 m)	Flotante	650 a.c - 350 d.c	No	<i>Martín-Puertas et al., 2009</i>
Montcortès	42 ° 19' N, 0°59'E (31 m)	Absoluta	763 a.c-2014 AD	Si (0-3%)	<i>Corella et al., 2012; 2014; 2016; Rull et al., 2021</i>

Tabla 1. Detalles de las cronologías de varvas en los diferentes sistemas lacustres varvados de la Península Ibérica.

Table 1. Details of the varve chronologies from the different lacustrine varved settings in the Iberian Peninsula.

morfológico y limnológico es relativamente similar, los modelos cronológicos presentan diferentes rangos temporales.

4.1. La laguna de Zoñar

La laguna de Zoñar está situado en la provincial de Córdoba y es el lago más profundo (15 m) y de mayores dimensiones de la cuenca del Guadalquivir. La secuencia lacustre de este lago tiene 6 metros de longitud y cubre los últimos 4000 años. El último metro del registro muestra un depósito de paleosuelo datado en 2620 años antes de la actualidad. Encima del paleosuelo hay un depósito varvado de aproximadamente un metro de espesor que cubre el periodo Ibero-romano entre el 650 AC y el 350 AD (Martín-Puertas *et al.* 2008). Las varvas de Zoñar son de tipo biogénicas y están compuestas por tres laminas que representan diferentes estaciones en el ciclo anual del lago. Una lámina de calcita autigénica que precipita en primavera/principio del verano cuando el lago se estratifica, una lámina orgánica que representa la productividad del lago durante la estación más cálida y la lámina de micrita detrítica depositada durante el otoño e invierno coincidiendo con los meses más lluviosos (Martín-Puertas *et al.*,

2009) (Fig. 3). Este periodo varvado se ha interpretado como un periodo húmedo con un nivel del lago superior al actual que dio lugar a un régimen meromíctico, es decir, con una capa anóxica permanente en el fondo que permitió la conservación de las varvas. La cronología del registro de Zoñar está basada en nueve dataciones de carbono 14 y el conteo de varvas a lo largo del intervalo laminado que ha permitido hacer reconstrucciones paleoambientales con un alto control cronológico (Martín-Puertas *et al.*, 2009; 2010; 2011).

4.2. El lago de Montcortès

El lago de Montcortès, situado en el Prepirineo central en la provincia de Lleida, es un lago kárstico de 30 metros de profundidad con formación de varvas biogénicas en la actualidad registrando una secuencia varvada de 2800 años, la más extensa de la Península Ibérica. La formación de varvas biogénicas ha sido ampliamente estudiada y monitorizada durante la última década para comprender los modelos deposicionales y mecanismos que intervienen en la formación de las diferentes laminas (Corella *et al.* 2012, 2014; Trapote *et al.* 2018b, Vegas-Vilarrúbia *et al.* 2020). De esta manera, se conoce que las

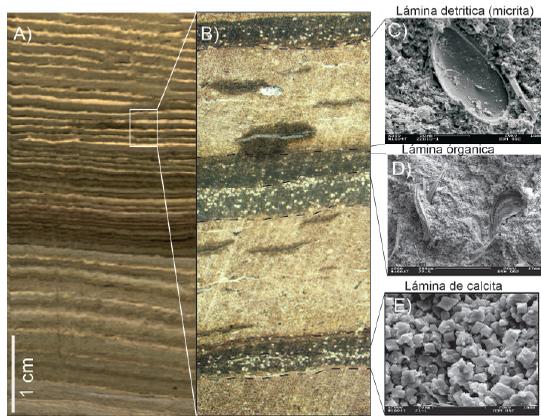


Fig. 3. Ejemplo de varvas biogénicas en la laguna de Zoñar. A) Foto del sondeo mostrando la secuencia finamente laminada; B) Fotografía de microscopía óptica mostrando las láminas correspondientes a un ciclo de deposición anual; C-E) Imagen de microscopía electrónica (SEM) de las diferentes sub-láminas que forman la varva. C) Micrita detrítica con un ostrácodo en el medio. D) Diatomeas en una matriz de calcita y materia orgánica. E) Cristales de calcita endogénica.

Fig. 3. Example of biogenic varves in Zoñar Lake; A) Core photo showing finely-laminated sediments; B) Optical microscope image showing the different layers within the annual cycle; C-E) SEM images of the different varve sub-layers. C) Micrite and an ostracod. D) Diatoms contained in a matrix composed of organic matter and authigenic calcite. E) Endogenic calcite crystals.

láminas de calcita precipitan actualmente a final de verano y principios de otoño, mientras que la lámina orgánica se deposita a lo largo de todo el ciclo anual (Fig. 4). Este registro presenta una cronología absoluta desde la actualidad hasta el año 763 AC con un error medio de entre el 0 y el 3 % dependiendo de la calidad de preservación de las varvas a diferentes profundidades. Esta cronología en base al conteo de varvas es coherente con otros modelos de datación independientes en base a dataciones de carbono 14 y plomo 210 (Corella *et al.* 2012; 2014; 2016; Rull *et al.* 2021a), proporcionando una mayor robustez al modelo de profundidad-edad analizado en este registro. La cronología varvada del lago de Montcortès es la más larga de todo el Mediterráneo occidental, y ha permitido realizar múltiples investigaciones paleoambientales reconstruyendo cambios de alta resolución en la dinámica de la vegetación

en la zona (Montoya *et al.* 2018, Trapote *et al.* 2018a, Rull *et al.* 2021a, b), reconstruir la evolución de la anoxia en el lago (Vegas-Vilarrúbia *et al.* 2018) y la precipitación regional a nivel estacional (Vegas-Vilarrúbia *et al.* 2022) o entender los cambios en la estacionalidad de los eventos hidrológicos extremos durante los últimos 2800 años (Corella *et al.* 2016) o los mecanismos que controlan la erosión estacional de suelos en cuencas mediterráneas durante el último milenio (Corella *et al.* 2019).

4.3. Otros ejemplos

El lago de Banyoles (Girona) es el mayor lago kárstico en la Península Ibérica. Una de sus cubetas presenta condiciones meromícticas (condiciones anóxicas permanente en el fondo del lago) permitiendo el desarrollo y preservación de varvas biogénicas en sus primeros 85 centímetros de su secuencia sedimentaria, constituyendo un registro varvado desde finales del siglo XIX (Morellón *et al.* 2015). El desarrollo de varvas biogénicas se debe, en gran medida a procesos de eutrofización debido a actividades agrícolas y ganaderas en la cuenca del lago. El desarrollo de un modelo cronológico de varvas para este intervalo todavía no se encuentra finalizado y, por tanto, está pendiente de validación y posterior publicación.

El lago de Arreo, localizado en el noroeste de la Cuenca del Ebro, es el lago natural más profundo del País Vasco, con 24 metros de profundidad, y una morfología en forma de embudo que favorece el desarrollo de condiciones anóxicas. Las varvas se desarrollan en los primeros 52 cm de profundidad. El modelo de varvas en Arreo, establecido en el año 2011, es de tipo flotante para el intervalo 1952-1998 AD (Corella *et al.* 2011). Sin embargo, estudios posteriores en este registro han revelado intervalos varvados discontinuos desarrollados durante los últimos 1400 años (Corella *et al.* 2013; 2021).

El lago La Cruz, situado en la Cordillera Ibérica, está emplazado en una dolina conocida

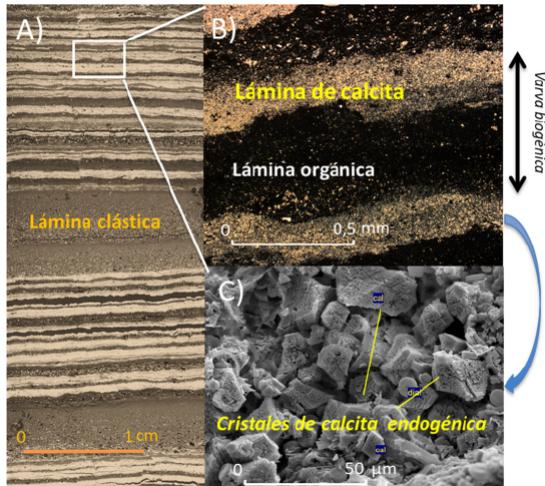


Fig. 4. Ejemplo de varvas biogénicas en el lago de Montcortès; A) Lámina escaneada mostrando la secuencia finamente laminada; B) Fotografía de microscopía óptica mostrando las láminas correspondientes a un ciclo de deposición anual; C) Cristales de calcita endogénica obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido.

Fig. 4. Example of biogenic varves in Lake Montcortès; A) scanned thin section showing the finely laminated sequence; B) Optical microscope image showing the different layers within the annual cycle; C) Endogenic calcite crystals acquired using SEM.

localmente como “torca”. Este registro presenta una cronología absoluta desde el año 1579 AD hasta el presente (Romero-Viana *et al.*, 2011). Además, la calidad excepcional de las varvas biogénicas durante el siglo XX ha permitido usar el espesor de la laminación como un indicador climático basado en una relación directa entre el espesor de las láminas de calcita y datos instrumentales de precipitación de invierno (Romero-Viana *et al.*, 2008), lo que ha permitido reconstruir dicho parámetro durante los últimos cuatro siglos (Romero-Viana *et al.*, 2011).

5. Nuevas metodologías a explorar en la datación de sedimentos varvados de la Península Ibérica

Las cronologías de varvas de la laguna de Zorñar (flotante) y del lago de Montcortès (absoluta) han sido validadas y ancladas a la edad

calendario utilizando otros métodos independientes de datación radiométrica (carbono 14, cesio 137, plomo 210). Recientes avances en la investigación de criptotefras en sedimentos varvados de Europa muestran que este tipo de registros son de gran valor para la tefrocronología y la tefroestratigrafía en Europa (Wulf *et al.*, 2004; Lane *et al.*, 2013; 2015; Wulf *et al.*, 2015; Martin-Puertas *et al.*, 2021; Walsh *et al.*, 2021). La identificación de horizontes de tefra en varvas, no solo beneficia a las cronologías anuales disminuyendo el error asociado al conteo, sino que permite distinguir erupciones volcánicas consecutivas que, en otro tipo de registros como turberas o sedimentos lacustres masivos, se considerarían una misma erupción (Walsh *et al.*, 2021). La identificación de horizontes de tefra en varvas también permite sincronizar registros a escala regional e incluso hemisférica (Lane *et al.*, 2013; Wulf *et al.*, 2015).

Casi todos los horizontes de tefra de edad cuaternaria que se han encontrado en la zona atlántica y en Europa provienen de Islandia e Italia, sin embargo las nuevas metodologías empleadas están haciendo posible identificar y clasificar criptotefras con un número reducido de cristales volcánicos y ya son varios registros en Irlanda, el Reino Unido y Polonia donde se han encontrado cenizas volcánicas procedentes de las Azores (Plunkett and Pilcher, 2018; Wastegård *et al.*, 2020; Kinder *et al.*, 2020; Walsh *et al.*, 2021). El régimen de vientos que transporta estas cenizas volcánicas desde las Azores hasta el noroeste y noreste de Europa transcurre por la Península Ibérica, lo cual sugiere que sería posible encontrar niveles de tefra en las varvas ibéricas. Avances en esta línea serían importantes para sincronizar cambios ambientales y climáticos en la Península Ibérica con el resto de Europa.

6. Resumen y Conclusiones

La cronología obtenida en sedimentos con laminación anual proporciona mayor resolución cronológica (junto con la dendrocrono-

logía y los sondeos de hielo) proporcionando un marco cronológico excelente para llevar a cabo investigaciones donde evaluar cambios ambientales del pasado a escala anual, e incluso estacional. Sin embargo, la obtención de modelos cronológicos robustos requiere la aplicación de una metodología sistemática y minuciosa de especialistas experimentados en sedimentología experimentados. Desafortunadamente, los registros sedimentarios varvados son todavía escasos a nivel global, y muestran una distribución muy heterogénea, estando ubicados fundamentalmente en Europa y Norteamérica. En la Península Ibérica solamente han sido datadas dos secuencias varvadas (el lago de Montcortès y la laguna de Zoñar) cuyo registro abarque periodos anteriores a la Edad Moderna (i.e. anterior a 1500 AD). Sin embargo, la marcada estacionalidad del clima mediterráneo y la presencia de lagos profundos con condiciones anóxicas en el fondo, sugieren que es posible encontrar y datar nuevos registros sedimentarios con una laminación anual que permitan entender mejor los cambios ambientales del pasado y evaluar la interacciones entre el ser humano y el medioambiente durante los últimos siglos y/o milenios.

Bibliografía

- Bendle, J.M., Palmer, A.P., Thorndycraft, V.R., Mathews, I.P. (2019). Phased Patagonian Ice Sheet response to Southern Hemisphere atmospheric and oceanic warming between 18 and 17 ka. *Scientific Reports* 9, 4133. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39750-w>
- Brauer, A., Allen, J.R., Mingram, J., Dulski, P., Wulf, S., Huntley, B., (2007). Evidence for last interglacial chronology and environmental change from Southern Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 450-455. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603321104>
- Brauer, A., Endres, C., Zolitschka, B., Negendank, J.F., (2000). AMS radiocarbon and varve chronology from the annually laminated sediment record of Lake Meerfelder Maar, Germany. *Radiocarbon* 42, 355-368. <https://doi.org/10.1017/S0033822200030307>
- Corella, J., B. Valero-Garcés, S. Vicente-Serrano, A. Brauer, G. Benito (2016). On the frequency, seasonality and atmospheric drivers of Late Holocene heavy rainfall in Western Mediterranean. *Scientific Reports.*, 6, 1-11. <https://doi.org/10.1038/srep38206>
- Corella, J. P., A. Amrani, J. Sigró, M. Morellón, E. Rico, B. Valero-Garcés (2011). Recent evolution of Lake Arreo, northern Spain: influences of land use change and climate. *Journal of Paleolimnology*, 46, 469-485. <https://doi.org/10.1007/s10933-010-9492-7>
- Corella, J. P., G. Benito, A. Monteoliva, J. Sigo, M. Calle, B. L. Valero-Garcés, V. Stefanova, E. Rico, A.-C. Favre, B. Wilhelm (2021). A 1400-years flood frequency reconstruction for the Basque country (N Spain): Integrating geological, historical and instrumental datasets. *Quaternary Science Reviews*, 262, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106963>
- Corella, J. P., G. Benito, X. Rodríguez-Lloveras, A. Brauer, B. L. Valero-Garcés (2014). Annually-resolved lake record of extreme hydro-meteorological events since AD 1347 in NE Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 93, 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.03.020>
- Corella, J. P., G. Benito, B. Wilhelm, E. Montoya, V. Rull, T. Vegas-Vilarrúbia, B. L. Valero-Garcés (2019). A millennium-long perspective of flood-related seasonal sediment yield in Mediterranean watersheds. *Global and Planetary Change*, 177, 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.016>
- Corella, J. P., A. Brauer, C. Mangili, V. Rull, T. Vegas-Vilarrúbia, M. Morellón, B. L. Valero-Garcés (2012). The 1.5-ka varved record of Lake Montcortès (southern Pyrenees, NE Spain). *Quaternary Research*, 78, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.06.002>
- Corella, J. P., V. Stefanova, A. El Anjoumi, E. Rico, S. Giralt, A. Moreno, A. Plata-Montero, B. L. Valero-Garcés (2013). A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 555-568. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.022>
- de Geer, G. (1912). Greochronologie der letzten 12000 Jahre. *Geologische Rundschau*, 3, 457-471. <https://doi.org/10.1007/BF01802565>
- Ebert, T., Trauth, M.H. (2015). Semi-automated detection of annual laminae (varves) in lake sediments using a fuzzy logic algorithm. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 435, 272-282. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.05.024>

- Francus, P., Keimig, F., Besonen, M. (2002). An algorithm to aid varve counting and measurement from thin-sections *Journal of Paleolimnology*, 28, 283-286. <https://doi.org/10.1023/A:1021624415920>
- Lane, C.S., Brauer, A., Martín-Puertas, C., Blockley, S.P., Smith, V.C., Tomlinson, E.L., (2015). The Late Quaternary tephrostratigraphy of annually laminated sediments from Meerfelder Maar, Germany. *Quaternary Science Reviews* 122, 192-206. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.025>
- Lane, C.S., A. Brauer, Simon P.E. Blockley, P. Dulski (2013). Volcanic ash reveals time-transgressive abrupt climate change during the Younger Dryas. *Geology* 2013; 41 (12): 1251-1254. <https://doi.org/10.1130/G34867.1>
- Kienel, U., Bowen, S.W., Byrne, R., Park, J., Böhnel, H., Dulski, P., Luhr, J.F., Siebert, L., Haug, G.H., Negendank, J.F. (2009). First lacustrine varve chronologies from Mexico: impact of droughts, ENSO and human activity since AD 1840 as recorded in maar sediments from Valle de Santiago. *Journal of Paleolimnology* 42, 587-609. <https://doi.org/10.1007/s10933-009-9307-x>
- Kinder, M., Wulf, S., Appelt, O., Hardiman, M., Z arczynski, M., Tylmann, W. (2020). Late- Holocene ultra-distal cryptotephra discoveries in varved sediments of Lake Z abin'skie, NE Poland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 402, 106988. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106988>
- Lotter, A. F. y G. Lemcke (1999). Methods for preparing and counting biochemical varves. *Boreas*, 28, 243-252. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00218.x>
- Marshall, M., Schlolaut, G., Nakagawa, T., Lamb, H., Brauer, A., Staff, R., Ramsey, C.B., Tarasov, P., Gotanda, K., Haraguchi, T. (2012). A novel approach to varve counting using μ XRF and X-radiography in combination with thin-section microscopy, applied to the Late Glacial chronology from Lake Suigetsu, Japan. *Quaternary Geochronology* 13, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2012.06.002>
- Martín-Puertas, C., B. L. Valero-Garcés, P. Mata, P. González-Sampérez, R. Bao, A. Moreno, V. Stefanova (2008). Arid and Humid Phases in Southern Spain during the last 4000 Years: The Zoñar Lake Record, Córdoba. *The Holocene*, 18, 907-921. <https://doi.org/10.1177/0959683608093533>
- Martín-Puertas, C., B. Valero-Garcés, A. Brauer, M. P. Mata, A. Delgado-Huertas, P. Dulski (2009). The Iberian-Roman Humid Period (2600-1600 cal yr BP) in the Zoñar Lake varve record (Andalucía, southern Spain). *Quaternary Research*, 71, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.10.004>
- Martín-Puertas, C., Martínez-Ruiz, F., Jimenez Espejo, F.J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo, M., Mata, M.P., Valero-Garcés, B.L., (2010). Late Holocene climate variability in the southwestern Mediterranean region: an integrated marine and terrestrial geochemical approach. *Climate of the Past* 6, 807-816. <https://doi.org/10.5194/cp-6-807-2010>
- Martín-Puertas, C., Valero-Garcés, B.L., Mata, M.P., Moreno, A., Giralt, S., Martínez-Ruiz, F., Jiménez-Espejo, F., (2011). Geochemical processes in a Mediterranean Lake: a high-resolution study of the last 4,000 years in Zoñar Lake, southern Spain. *Journal of Paleolimnology* 46, 405-421. <https://doi.org/10.1007/s10933-009-9373-0>
- Martin-Puertas, C., Matthes, K., Brauer, A., Muscheler, R., Hansen, F., Petrick, C., Aldahan, A., Possnert, G., van Geel, B., (2012). Regional atmospheric circulation shifts induced by a grand solar minimum. *Nature Geosciences* 5, 397-401. <https://doi.org/10.1038/ngeo1460>
- Martin-Puertas, C., Brauer, A., Wulf, S., Ott, F., Lauterbach, S., Dulski, P., (2014). Annual proxy data from Lago Grande di Monticchio (southern Italy) between 76 and 112 ka: new chronological constraints and insights on abrupt climatic oscillations. *Climate of the Past* 10, 2099-2114. <https://doi.org/10.5194/cp-10-2099-2014>
- Martin-Puertas, C., Lauterbach, S., Allen, J.R., Perez, M., Blockley, S., Wulf, S., Huntley, B., Brauer, A., (2019). Initial Mediterranean response to major climate reorganization during the last interglacial-glacial transition. *Quaternary Science Reviews* 215, 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.05.019>
- Martin-Puertas, C., Walsh, A.A., Blockley, S.P., Harding, P., Biddulph, G.E., Palmer, A., Ramisch, A., Brauer, A., (2021). The first Holocene varve chronology for the UK: Based on the integration of varve counting, radiocarbon dating and tephrostratigraphy from Diss Mere (UK). *Quaternary Geochronology* 61, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101134>
- Montoya, E., V. Rull, T. Vegas-Villarrúbia, J. P. Corella, S. Giralt, B. Valero-Garcés (2018). Grazing activities in the southern central Pyrenees during the last millennium as deduced from the non-pollen palynomorphs (NPP) record

- of Lake Montcortès. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 254, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.04.005>
- Morellón, M., F. S. Anselmetti, B. L. Valero Garcés, F. Barreiro-Lostres, D. Ariztegui, S. Giralt Romeu, A. Sáez, M. P. Mata (2015). Local formation of varved sediments in a karstic collapse depression of Lake Banyoles (NE Spain). *Geogaceta*, 2015, vol. 57, p. 119-122. <http://hdl.handle.net/10261/122594>
- Ojala, A. E. K., P. Francus, B. Zolitschka, M. Besonen, S. F. Lamoureux (2012). Characteristics of sedimentary varve chronologies - A review. *Quaternary Science Reviews*, 43, 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.04.006>
- Plunkett, G., Pilcher, J.R. (2018). Defining the potential source region of volcanic ash in northwest Europe during the Mid- to Late Holocene. *Earth-Science Reviews* 179, 20-37. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.006>
- Ramisch, A., A. Brauser, M. Dorn, C. Blanchet, B. Brademann, M. Köppl, J. Mingram, I. Neugebauer, N. Nowaczyk, F. Ott (2020). VARDA (VARved sediments DAtabase)-providing and connecting proxy data from annually laminated lake sediments. *Earth System Science Data*, 12, 2311-2332. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2311-2020>
- Ramsey, C.B. (1995). Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program. *Radiocarbon* 37, 425-430. <https://doi.org/10.1017/S0033822200030903>
- Ramsey, B., C., R. A. Staff, C. L. Bryant, F. Brock, H. Kitagawa, J. Van Der Plicht, G. Schlolaut, M. H. Marshall, A. Brauer, H. F. Lamb (2012). A complete terrestrial radiocarbon record for 11.2 to 52.8 kyr BP. *Science*, 338, 370-374. <https://doi.org/10.1126/science.1226660>
- Romero-Viana, L., R. Julià, A. Camacho, E. Vicente, M. Miracle (2008). Climate signal in varve thickness: Lake La Cruz (Spain), a case study. *Journal of Paleolimnology*, 40, 703-714. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9194-6>
- Romero-Viana, L., R. Julià, M. Schimmel, A. Camacho, E. Vicente, M. Miracle (2011). Reconstruction of annual winter rainfall since A.D.1579 in central-eastern Spain based on calcite laminated sediment from Lake La Cruz. *Climatic Change*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9966-7>
- Rull, V., T. Vegas-Vilarrúbia, J. P. Corella, M. C. Trapote, E. Montoya, B. Valero-Garcés (2021a). A unique Pyrenean varved record provides a detailed reconstruction of Mediterranean vegetation and land-use dynamics over the last three millennia. *Quaternary Science Reviews*, 268, 107128. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107128>
- Rull, V., T. Vegas-Vilarrúbia, J. P. Corella, B. Valero-Garcés (2021b). Bronze Age to Medieval vegetation dynamics and landscape anthropization in the southern-central Pyrenees. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 571,110392. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110392>
- Schimmelmann, A., C. B. Lange, J. Schieber, P. Francus, A. E. Ojala, B. Zolitschka (2016). Varves in marine sediments: A review. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.04.009>
- Sear, D.A., Allen, M.S., Hassall, J.D., Maloney, A.E., Langdon, P.G., Morrison, A.E., Henderson, A.C.G., Mackay, H., Croudace, I.W., Clarke, C., Sachs, J.P., Macdonald, G., Chiverrell, R.C., Leng, M.J., Cisneros-Dozal, L.M., Fonville, T., Pearson, E., (2020). Human settlement of East Polynesia earlier, incremental, and coincident with prolonged South Pacific drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 8813-8819. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920975117>
- Sturm, M., Lotter, A., (1995). Lake sediments as environmental archives. *EAWAG News E* 38, 6-9.
- Trapote, M. C., V. Rull, S. Giralt, J. P. Corella, E. Montoya, T. Vegas-Vilarrúbia (2018a). High-resolution (sub-decadal) pollen analysis of varved sediments from Lake Montcortès (southern Pyrenean flank): A fine-tuned record of landscape dynamics and human impact during the last 500 years. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 259, 207-222. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.10.002>
- Trapote, M. C., T. Vegas-Vilarrúbia, P. López, E. Puche, J. Gomà, T. Buchaca, N. Cañellas-Boltà, E. Safont, J. P. Corella, V. Rull (2018b). Modern sedimentary analogues and integrated monitoring to understand varve formation in the Mediterranean Lake Montcortès (Central Pyrenees, Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 496, 292-304. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.01.046>
- Valero-Garcés, B. L., Corella, J. P. (2018). Varve chronology. *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, 1-4. <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0592>
- Vegas-Vilarrúbia, T., J. P. Corella, N. Pérez-Zanón, T. Buchaca, M. C. Trapote, P. López, J. Sigró, V. Rull (2018). Historical shifts in oxygenation regime as recorded in the laminated sedi-

- ments of lake Montcortès (Central Pyrenees) support hypoxia as a continental-scale phenomenon. *Science of the total environment*, 612, 1577-1592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.148>
- Vegas-Vilarrúbia, T., J. P. Corella, J. Sigró, V. Rull, I. Dorado-Liñan, B. Valero-Garcés, E. Gutiérrez-Merino (2022). Regional precipitation trends since 1500 CE, reconstructed from calcite sublayers of a varved Mediterranean lake record (Central Pyrenees). *Science of The Total Environment*, 153773. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153773>
- Vegas-Vilarrúbia, T., V. Rull, M. d. C. Trapote, M. Cao, A. Rosell-Melé, T. Buchaca, J. Gomà, P. López, J. Sigró, E. Safont (2020). Modern analogue approach applied to high-resolution varved sediments—A synthesis for Lake Montcortès (Central Pyrenees). *Quaternary*, 3, 1. <https://doi.org/10.3390/quat3010001>
- Walsh, A.A., Blockley, S.P.E., Milner, A.M., Matthews, I.P., Martin-Puertas, C., (2021). Complexities in European Holocene cryptotephra dispersal revealed in the annually laminated lake record of Diss Mere, East Anglia. *Quaternary Geochronology* 66, 101213. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2021.101213>
- Wastegård, S., Johansson, H., Pacheco, J.M., (2020) New major element analyses of proximal tephtras from the Azores and suggested correlations with cryptotephtras in North-West Europe. *Journal of Quaternary Science*, 35, 114-121. <https://doi.org/10.1002/jqs.3155>
- Weber, M., Reichelt, L., Kuhn, G., Pfeiffer, M., Korff, B., Thurow, J., Ricken, W., (2010). BMPix and PEAK tools: New methods for automated laminae recognition and counting-Application to glacial varves from Antarctic marine sediment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 11. Q0AA05, <https://doi.org/10.1029/2009GC002611>
- Wolff, C., Haug, G.H., Timmermann, A., Damsté, J.S.S., Brauer, A., Sigman, D.M., Cane, M.A., Verschuren, D. (2011). Reduced interannual rainfall variability in East Africa during the last ice age. *Science* 333, 743-747. <https://doi.org/10.1126/science.1203724>
- Wulf, S., Kraml, M., Brauer, A., Keller, J., Negen-dank, J.F.W. (2004). Tephrochronology of the 100ka lacustrine sediment record of Lago Grande di Monticchio (southern Italy). *Quaternary International*. 122, 7-30. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.028>
- Żarczyński, M., Tylmann, W., Goslar, T. (2018). Multiple varve chronologies for the last 2000 years from the sediments of Lake Żabińskie (northeastern Poland)-Comparison of strategies for varve counting and uncertainty estimations. *Quaternary Geochronology* 47, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2018.06.001>
- Zolitschka, B. (2007). Varved lake sediments. *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Amsterdam, 3105, 3114. <https://doi.org/10.1016/B0-44-452747-8/00065-X>
- Zolitschka, B., Francus, P., Ojala, A.E., Schimmelmänn, A., (2015). Varves in lake sediments-a review. *Quaternary Science Reviews* 117, 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019>

Recibido el 31 de marzo de 2022

Aceptado el 30 de agosto de 2022

