



Cronología “extrema”: Generación de modelos cronológicos robustos a partir de diferentes métodos de datación; ejemplos en la Península Ibérica

“Extreme chronologies”: Robust chronological models combining different dating methods; examples from the Iberian Peninsula

Moreno, A.⁽¹⁾; Gil-Romera, G.⁽²⁾; Bartolomé, M.⁽¹⁾; Valero-Garcés, B.⁽¹⁾; González-Sampériz, P.⁽¹⁾

(1) Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC, Zaragoza, Spain.
amoreno@ipe.csic.es; pgonzal@ipe.csic.es

(2) Ecology Research Group, Department of Biology, Philipps University of Marburg, Marburg, Germany.

Resumen

En este trabajo se presenta el reto que muchas veces supone conseguir un buen modelo de edad independiente en una secuencia paleoambiental. Esta aproximación pasa por la necesidad de combinar diferentes metodologías de datación, con la complejidad que esto implica. Se han seleccionado dos ejemplos de dos archivos paleoambientales muy distintos, y con cronologías muy diferentes. El registro de El Cañizar de Villarquemado, un paleolago en la provincia de Teruel, que alberga en sus sedimentos los últimos 135.000 años de historia y constituye la secuencia continental más larga y continua estudiada en la mitad septentrional de Iberia. Para poder establecer un modelo de edad robusto e independiente fue necesario combinar dataciones de radiocarbono AMS, U-Th, OSL, IRSL, paleomagnetismo y criptotefro-cronología, aunque no todas las técnicas resultaron exitosas. El segundo ejemplo se centra en el reto de datar el hielo presente en el icónico glaciar de Monte Perdido, situado en el Pirineo Central, Huesca. Este registro se consiguió datar mediante radiocarbono en diferentes tipos de muestras y aplicando las técnicas de Pb²¹⁰ y Cs¹³⁷ para el periodo más reciente. En ambos ejemplos, las combinaciones de métodos y tipo de muestras datadas permitieron obtener cronologías robustas gracias a una importante inversión de tiempo y financiación, siendo el resultado de la colaboración de varios equipos de investigación. En este trabajo se esbozan las dificultades encontradas en la elaboración de ambas cronologías y se presenta el resultado final, fruto de una modelización que combina las diferentes aproximaciones para obtener los modelos de edad definitivos.

Palabras clave: datación combinando métodos; glaciar; paleolago; C¹⁴; OSL; Pb²¹⁰.



Abstract

This work presents the challenge that often involves obtaining a good independent age model in a paleoenvironmental sequence by combining different methodologies and dating systems, with the complexity that this implies. Specifically, two examples have been selected from two very different paleoenvironmental archives, and very different chronologies, both obtained in the northeast of the Iberian Peninsula. The record of El Cañizar de Villarquemado, a paleolake in Teruel province which covers the last 135,000 years of history, that is, the longest continuous continental sequence studied to date in the northern half of Iberia. In order to establish a robust and independent age model it was necessary to combine radiocarbon, U-Th, OSL, IRSL, paleomagnetism and cryptotephro-chronology methods, although not all techniques were successful. The second example focuses on the challenge of dating the ice present in the iconic Monte Perdido glacier, located in the Central Pyrenees, Huesca. Its chronology was achieved by radiocarbon dating in different types of samples and applying the ^{210}Pb and ^{137}Cs techniques for the most recent period. In both examples, the combination of methods and type of dated samples allowed obtaining robust chronologies after a significant effort of time and funding, as well as the collaboration of various research teams and laboratories. In this work, the difficulties existing for using different dating methods in the elaboration of a chronology are outlined and the final results, using different types of chronological modeling combining the different approaches to obtain the definitive age models are also presented.

Key words: multi-method chronologies, glacier, paleolake, ^{14}C , OSL, ^{210}Pb .

1. Introducción

La reconstrucción de los climas y cambios ambientales del pasado requiere de un marco temporal lo más preciso posible, que sitúe los eventos de cambio identificados en una cronología numérica. Ese marco permitirá, por un lado, comparar registros de diferentes áreas y analizar su sincronía o asincronía, y por otro, establecer cronologías robustas, lo que resulta fundamental para determinar la duración de cada cambio y la rapidez de las transiciones. Todo ello es un requisito primordial para describir la variabilidad natural a diferentes escalas temporales durante el Cuaternario, desde un marco estacional o anual (Baldini *et al.*, 2021; Tylmann y Zolitschka, 2020), hasta la escala orbital (Lian y Roberts, 2006). Son muchos y variados los métodos de datación -según el periodo temporal y el tipo de archivo geológico- que nos permiten abordar la elaboración de ese marco cronológico imprescindible (Brauer *et al.*, 2014). De entre ellos, las dataciones radiocarbónicas son las más extendidas y se han convertido en el método por excelencia, tanto para sedimentos lacustres como marinos (Hajdas, 2008), además de para yacimientos arqueológicos (ej., proyecto

IDEArq <http://www.idearqueologia.org/index.php?ln=es> del CCHS del CSIC), y depósitos de casi cualquier tipo, siempre que sean susceptibles de contener restos de materia orgánica (ej., cuevas de hielo, Leunda *et al.*, 2019). Pero las dataciones de C^{14} sólo son válidas para el Holoceno y última fase del Pleistoceno superior, dado su límite temporal (en torno a 50.000 años máximo: ver artículo monográfico en este mismo volumen), por lo que para situar las reconstrucciones paleoambientales en un marco temporal amplio, se hace necesaria la combinación de varios tipos de datos, maximizando las oportunidades de conseguir un buen modelo de edad. Ante la falta de restos orgánicos o frente a un umbral cronológico más amplio que el abarcado por el radiocarbono, nos encontramos con diferentes opciones que deben ser valoradas en cada caso (de nuevo, nos remitimos a los diferentes artículos que componen este volumen), según el material susceptible de análisis, potencial periodo temporal previsto, posibilidades de financiación, etc. Y por supuesto, al reto de combinar varias de las técnicas de datación posibles, teniendo en cuenta las limitaciones y ventajas de cada una de ellas.

Así, un aspecto fundamental es considerar la incertidumbre asociada a cada método y poder introducirla cuando establecemos el modelo de edad de la secuencia. En este sentido, la inferencia bayesiana (Bayes y Price, 1763) ha supuesto un gran avance, puesto que permite plantear probabilidades subjetivas, es decir, basadas en conocimiento adicional que se va adquiriendo sobre un determinado experimento. En el caso concreto de la producción de modelos de edad-profundidad del registro sedimentario, nos permite incorporar el potencial conocimiento previo sobre una secuencia (ej., sobre las tasas de sedimentación de distintas facies) a la incertidumbre del modelo de edad. Esto facilita obtener marcos cronológicos realistas (Blaauw, 2010; Blaauw *et al.*, 2021) que, en muchos casos, evitan la interpolación lineal directa entre muestras datadas (que por lo general, erróneamente, asumen tasas de acumulación constantes). Además, los modelos estadísticos bayesianos permiten combinar fuentes cronológicas, tanto absolutas como relativas, provenientes de diferentes contextos sedimentarios (Buck y Juárez, 2020).

En este trabajo, presentamos dos estudios que ejemplifican las situaciones anteriormente comentadas. El primero de ellos, El Cañizar de Villarquemado, es un paleolago situado en la población de Villarquemado (Teruel), que registra en sus sedimentos los últimos 135.000 años de historia paleoambiental. En este caso, la cronología se abordó mediante dataciones de radiocarbono AMS, U-Th, OSL-IRSL, paleomagnetismo y criptotefro-cronología, aunque no todas las técnicas resultaron exitosas. El segundo ejemplo resulta de los intentos de datación del hielo presente actualmente en el glaciar de Monte Perdido, situado en el Pirineo Central (Huesca). Este caso cubre los últimos 2000 años, y su cronología se obtuvo datando mediante radiocarbono distintos materiales (macro y micro-restos orgánicos, polen, polvo) y aplicando las técnicas de Pb^{210} y Cs^{137} . Para la producción de un modelo de edad robusto, en cada caso se han empleado técnicas de modelización diferentes, pero ambas disponibles en paquetes de R

(R Development Core Team, 2020) y aplicadas en un entorno Rstudio (R Studio CoreTeam, 2019). Conocer estos ejemplos puede ayudar a otros estudios en los que una única técnica de datación, y/o método de modelización, no sea suficiente para conseguir un buen marco cronológico.

2. Metodología

En este apartado resumimos por qué se decidió utilizar cada uno de los diferentes métodos de datación en los dos casos de estudio, los problemas inherentes a cada uno de ellos, así como los resultados obtenidos, si los hubo, incluyendo una breve descripción sobre los posibles motivos relacionados con los fracasos o fallos. Se introduce cómo fue el muestreo en campo para obtener cada uno de los dos registros.

2.1. El Cañizar de Villarquemado

En septiembre del año 2005 se realizó la campaña de recuperación consiguiendo 74 m de sondeo que conforman el registro sedimentario de la laguna de El Cañizar de Villarquemado. Se eligió un punto en la zona más deprimida de la cuenca lacustre, desecada desde el s.XVIII. Para obtener el registro se utilizó un equipo de perforación de geotecnia mediante percusión, ya que esperábamos obtener una secuencia larga, expectativa basada en estudios geofísicos previos que hablaban de hasta 75 m de secuencia Cuaternaria (Rubio y Simón, 2006). Todas las secciones del material obtenido en cada maniobra fueron convenientemente conservadas en papel de aluminio y tubos de PVC, y transportadas al laboratorio de sondeos del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC: <http://www.ipe.csic.es>), donde fueron analizadas y siguen conservadas en una cámara refrigerada a 4°C.

La primera aproximación, tras abrir y describir los sondeos siguiendo la metodología habitual del grupo (para más información: Aranbarri *et al.*, 2014; González-Sampériz *et*

al., 2020, 2013; Valero-Garcés *et al.*, 2019), fue realizar varias dataciones radiocarbónicas. No obstante, dada la longitud del registro sedimentario, en campo durante la extracción del sondeo se fueron seleccionando intervalos potencialmente arenosos en diferentes secciones y profundidades, para dejarlos sin abrir y poder datarlos por IRSL-OSL (ver artículo de este mismo volumen en relación a las dataciones por luminiscencia óptica estimulada-OSL). Del mismo modo, al describir los sondeos se aislaron los restos de gasterópodos que iban apareciendo, con el objetivo de intentar datarlos mediante la técnica del U-Th (igualmente, ver artículo de este mismo volumen para más información sobre esta técnica).

Con los primeros resultados obtenidos a partir de estas tres aproximaciones, y con una idea preliminar de la cronología que finalmente iba a abarcar la secuencia, se decidió intentar localizar la excursión de Blake (datada en el N de España entre hace 112 y 116.5 ka: Osete *et al.*, 2012), realizando algunas pruebas con paleomagnetismo, considerando sólo la inclinación y no la declinación, puesto que el sondeo no estaba orientado en el momento de la extracción. Del mismo modo, el interés de un equipo internacional especialista en análisis de tefras por obtener información de secuencias ibéricas, propició el intento de identificación de, primero tefras y luego criptotefras, tanto en el registro de Villarquemado como en varias secuencias lacustres más (ej., Enol, Estanya, Zoñar, Sanabria). Por último, la búsqueda de una mayor precisión cronológica nos llevó a invertir esfuerzos también en obtener dataciones de OSL mediante la técnica de datación de granos de cuarzo individuales (*single grain* del término en inglés, y como nos referiremos a ello de ahora en adelante).

Concretamente, se realizaron un total de 49 dataciones diferentes: 23 de AMS C^{14} , 6 de ISRL, 6 de U-Th, 3 de criptotefras, 10 de OSL y 1 de paleomagnetismo, a lo largo la secuencia y de casi 10 años de trabajo (Tabla 1). Varias de estas aproximaciones, sin embargo, no dieron resultados y/o fueron aberrantes,

por lo que no pudieron utilizarse finalmente en la elaboración del definitivo modelo de edad (para más detalles, tanto de las técnicas utilizadas como del procedimiento y metodología utilizado con cada una de ellas, ver Valero-Garcés *et al.*, 2019). En suma, no hubo resultados válidos ni a partir de los intentos con U/Th (bajo contenido en uranio y alta contaminación detrítica, tanto en los gasterópodos como en los niveles de travertino o de carbonatos clásticos seleccionados), ni se pudo localizar la excursión de Blake (a pesar de analizarse un total de 33 muestras en el intervalo sedimentario en el que inicialmente se pensaba podría estar el intervalo cronológico necesario), ni se detectaron ninguna tefra, ni criptotefra. En este sentido, las pruebas realizadas en diferentes secuencias lacustres distribuidas en localizaciones dispares de Iberia (N, S, NW y NE), confirmaron la imposibilidad de utilizar la identificación de tefras como sistema de datación en nuestras latitudes.

Del mismo modo, tanto una muestra de las analizadas por la tradicional IRSL, como una de las de OSL siguiendo la técnica de *single grain* (que aportan una mayor robustez estadística a sus fechas), resultaron nulas, además de un total de 7 muestras de radiocarbono AMS, ya que dieron dataciones estratigráficamente inconsistentes y debieron desecharse. Respecto a estas últimas, cabe mencionar que las 23 muestras analizadas para datar se realizaron sobre sedimento total, ya que no se encontraron restos orgánicos de origen terrestre a lo largo de todo el registro sedimentario, a pesar de las detalladas descripciones micro- y macroscópicas llevadas a cabo. Por ello, siempre que fue posible, se seleccionaron intervalos con alto contenido de carbono orgánico total, con el objetivo de asegurar la obtención de fechas y unos márgenes de error no demasiado elevados.

Finalmente, el modelo de edad-profundidad pudo llevarse a cabo utilizando un total de 33 muestras válidas, obtenidas a partir de 3 técnicas de datación diferentes, que resultaron las más adecuadas para la cronología y tipo de sedimento existente en la secuencia

Nº dataciones	Referencia Lab.	Signa	Prof (m)	Método	Material	Edad BP	Error	Edad cal BP
1	Beta-332033	VIL05-1A, 11cm	0,11	AMS C ¹⁴	Sedimento total	430	30	470
2	Beta-332034	VIL05-1A, 132 cm	1,32	AMS C ¹⁴	Sedimento total	7480	40	8276
3	Poz-19073	VIL05-1A, 220 cm	2,2	AMS C ¹⁴	Sedimento total	11950	70	13890
4	Beta-319644	VIL05-1B-1T-2, 2-3cm	0,62	AMS C ¹⁴	Sedimento total	2020	30	1970
5	Poz-18451	VIL05-1B-1T-2 36-37	0,965	AMS C ¹⁴	Sedimento total	3750	40	4111
6	Poz-18073	VIL05-1B-1T-3, 6-7	1,35	AMS C ¹⁴	Sedimento total	17950	70	15809
7	Poz-18569	VIL05-1B-1T-3 39-40	1,735	AMS C ¹⁴	Sedimento total	7480	50	8279
8	Poz-18453	VIL05-1B-1T-4 41-42	2,33	AMS C ¹⁴	Sedimento total	9820	50	11232
9	Poz-15943	VIL05-1B-1T-5, 55	3,07	AMS C ¹⁴	Sedimento total	11520	60	13481
10	Poz-22657	VIL05-1B-1T-6, 18	3,25	AMS C ¹⁴	Sedimento total	5780	60	6500
11	Poz-22659	VIL05-1B-1T-7, 25	3,7	AMS C ¹⁴	Sedimento total	6290	40	7216
12	Poz-18510	VIL05-1B-1T-7 55-56,5	4,17	AMS C ¹⁴	Sedimento total	8200	50	9162
13	Poz-18511	VIL05-1B-1T-8 32-35	4,514	AMS C ¹⁴	Sedimento total	15390	100	18840
14	Poz-15944	VIL05-1B-1T-10, 15	5,495	AMS C ¹⁴	Sedimento total	10280	110	21830
15		VIL05-1B-1T-11, 20	5,9	Cripto-Infra	<5 fragmentos/gr	SIN RESULTADOS		
16	Poz-18454	VIL05-1B-1T-12 16-17	6,38	AMS C ¹⁴	Sedimento total	22900	280	27633
17	Poz-15945	VIL05-1B-1T-14, 5	7,347	AMS C ¹⁴	Sedimento total	21920	140	25077
18	Poz-15946	VIL05-1B-1T-16, 5	8,61	AMS C ¹⁴	Sedimento total	32780	160	27511
19	Poz-18455	VIL05-1B-1T-18 13-14	9,89	AMS C ¹⁴	Sedimento total	27000	450	31302
20	Poz-23714	VIL05-1B-1T-20, 57	11,39	AMS C ¹⁴	Sedimento total	29520	380	30325
21		VIL05-1B-1T-22, 42	12,3	Cripto-Infra	<5 fragmentos/gr	SIN RESULTADOS		
22	Poz-15948	VIL05-1B-1T-24, 12	13,22	AMS C ¹⁴	Sedimento total	27960	300	32180
23	Poz-17384	VIL 05-1B-1T-26, 7	14,879	AMS C ¹⁴	Sedimento total	33300	800	39069
24	MAD-51728DA	VIL 05-1B-1T-34	18,328	IRSL	Sedimento siliciclástico	40421	3488	
25	Poz-17287	VIL05-1B-1T- 35, 44	19,122	AMS C ¹⁴	Sedimento total	38800	800	41687
26	Poz-17249	VIL05-1B-1T-39, 56	21,77	AMS C ¹⁴	Sedimento total	22920	300	27624
27	MAD-X	VIL05-1B-1T-40, 51-59	22,35	IRSL	Sedimento siliciclástico	SIN RESULTADOS		
28		VIL05-1B-1T-3-40	23,00	Cripto-Infra	Sedimento arena-arcilloso	SIN RESULTADOS		
29	V-49	VIL05-1B-1T-49	27	OBL	Granos individuales de cuarzo	49300	8000	
30	V-58	VIL05-1B-1T-58	31,8	OBL	Granos individuales de cuarzo	71700	9500	
31	VIL-1	VIL05-1B-1T-61, 40-60	33	UTh	Carbonatos cálcicos	79000	2300	
32	V-57	VIL05-1B-1T-67	36,55	OBL	Granos individuales de cuarzo	73300	8400	
33	V-59	VIL05-1B-1T-83	43,6	OBL	Granos individuales de cuarzo	SIN RESULTADOS		
34	MAD-51738DA	VIL05-1B-1T-92	48,89	IRSL	Sedimento siliciclástico	72457	5152	
35	V-99	VIL05-1B-1T-99	51,5	OBL	Granos individuales de cuarzo	84700	11500	
36	MAD-51963DA	VIL05-1B-1T-103	53,591	IRSL	Sedimento siliciclástico	80551	6616	
37		VIL05-1B-1T-102-109	57-58,5	Palaeomagnetismo	Sedimento total	SIN RESULTADOS		
38	V-110	VIL05-1B-1T-110	58,8	OBL	Granos individuales de cuarzo	104500	14100	
39	VIL-6	VIL05-1B-1T-112, 10-12	57,7	UTh	Travertino	89100	900	
40	V-117	VIL05-1B-1T-117	59,0	OBL	Granos individuales de cuarzo	126500	16500	
41	VIL-5	VIL05-1B-1T-118, 40	60,38	UTh	Travertino	17300	1300	
42	VIL-2	VIL05-1B-1T-119, 40-49	60,82	UTh	Gasterópodos	31800	900	
43	V-127	VIL05-1B-1T-127	63,9	OBL	Granos individuales de cuarzo	128000	9500	
44	V-135	VIL05-1B-1T-135	67,5	OBL	Granos individuales de cuarzo	134200	13200	
45	VIL-3	VIL05-1B-1T-142, 0-10	69,89	UTh	Gasterópodos	614300	10500	
46	VIL-4	VIL05-1B-1T-144, 0-5	70,6	UTh	Gasterópodos	840500	18200	
47	MAD-52008DA	VIL05-1B-1T-145	71,118	IRSL	Sedimento siliciclástico	115890	8996	
48	V-148	VIL05-1B-1T-148	72,7	OBL	Granos individuales de cuarzo	137100	11400	
49	MAD-52039DA	VIL05-1B-1T-149	73,4	IRSL	Sedimento siliciclástico	120603	8209	

Tabla 1. Relación de las 49 muestras objeto de datación, con diferentes metodologías, llevadas a cabo para obtener un modelo de edad-profundidad en la secuencia paleolacustre de 74 m de longitud de El Cañizar de Villarquemado (Teruel). En cursiva, todas las muestras que finalmente no han podido ser utilizadas en el modelo de edad definitivo, bien por falta de resultados, bien por incoherencia estratigráfica.

Table 1. List of the 49 samples subject to dating, with different methodologies, carried out to obtain an age-depth model in the 74 m-long paleolacustrine sequence of El Cañizar de Villarquemado (Teruel). In italics, all the samples that could not finally be used in the definitive age model, either due to lack of results, or due to stratigraphic inconsistency.

de El Cañizar de Villarquemado. Estas dataciones, no obstante, presentan márgenes de error y requerimientos de calibración muy diferentes, que implicaron el uso de la modelización bayesiana para la asignación de una edad de calendario para cada centímetro de la secuencia (ver apartado 3 de este artículo y Figura 1).

2.2. El Glaciar de Monte Perdido

El glaciar de Monte Perdido es actualmente uno de los glaciares mejor monitorizados del mundo, mostrando claramente que se encuentra en un claro retroceso, con tasas de pérdida de espesor de 1 m por año desde 1981 (López-Moreno *et al.*, 2019, 2016). Por otro lado, este glaciar, localizado en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, se encuentra en uno de los pocos lugares del Piri-

neo con información sobre las fluctuaciones glaciales del Holoceno. Se sabe, por ejemplo, que el glaciar avanzó durante el periodo Neoglacial, gracias a que la morrena más externa está datada en 6900 ± 800 CI³⁶ años antes del presente (García-Ruiz *et al.*, 2020). Están también bien identificadas, geomorfológicamente, las dos morrenas de la Pequeña Edad del Hielo (PEH) (García-Ruiz *et al.*, 2014) pero, sin embargo, se desconoce la respuesta del glaciar a periodos cálidos anteriores como el Periodo Romano (500 BCE- 400 años CE) o la Anomalía Climática Medieval (MCA, 900 - 1300 años CE). Responder a la pregunta de qué extensión tenía el glaciar en esos periodos, e incluso determinar si había llegado a desaparecer completamente alguna vez, fue el principal objetivo del estudio y tenía que ser resuelto con la datación del hielo presente hoy en el glaciar (Moreno *et al.*, 2021).

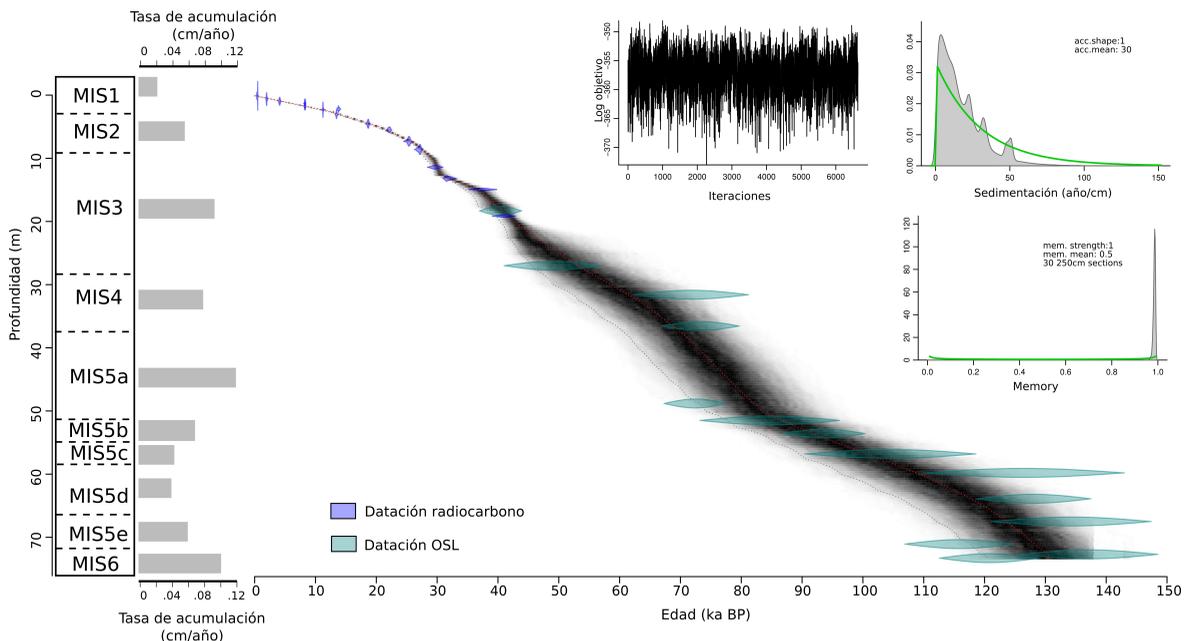


Figura 1. Modelo de edad del Cañizar de Villarquemado. En vertical se representa la profundidad y en horizontal la edad calibrada (Before Present). Se han representado las unidades temporales del último ciclo interglacial-glacial (LIG) con un histograma que refleja la diferente tasa de sedimentación media a lo largo de la 74 m de secuencia. Además, se representa la distribución del error tanto de las dataciones OSL como de radiocarbono. Modificada de Valero-Garcés *et al.*, (2019).

*Figure 1. Depth-age model for Cañizar de Villarquemado. Depth is the vertical axis and age (calibrated years Before Present) is the horizontal. The last interglacial-glacial cycle units appear on the left coupled to the average sedimentation rate for each unit. The error distribution for the OSL and ¹⁴C ages are also represented in different colours. Modified from Valero-Garcés *et al.*, (2019).*

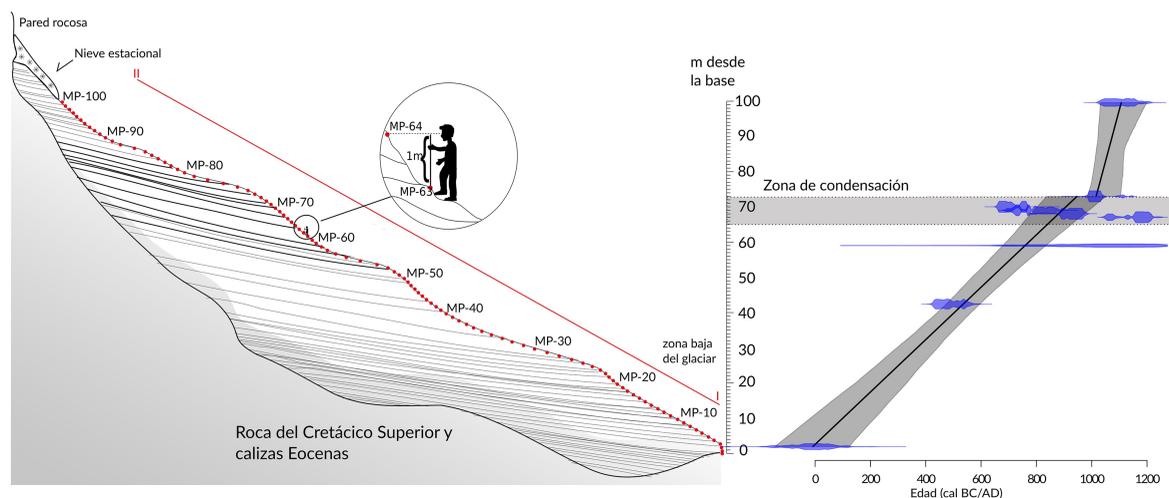


Figura 2. Izquierda: Esquema simplificado con la posición de las 100 muestras recogidas a lo largo de la pendiente del glaciar de Monte Perdido (la línea roja I-II indica la zona del perfil estudiada, con las muestras identificadas de MP-0 a MP-100). De acuerdo al buzamiento de las capas (la inclinación es aproximada), el material más antiguo se encontraría en la base de la secuencia. En la pequeña ampliación del dibujo se representa cómo fue la obtención de muestras, midiendo espesores de 1 m de altura. Derecha: Modelo de edad del hielo del glaciar de Monte Perdido basado en la interpolación lineal de los datos de C^{14} (Tabla 2), obtenido usando el software Clam (Blaauw, 2010; Blaauw *et al.*, 2019). El eje vertical indica el número de muestras tomadas en el glaciar, desde la muestra MP-0 hasta MP-100. Las fechas se muestran como distribuciones de la probabilidad de la edad en años calendario (en azul) mientras que la línea negra es el modelo edad-profundidad resultante (con el sombreado gris como el intervalo del 95% de confianza. En gris, se muestra un intervalo donde la acumulación de hielo fue especialmente baja, predominando los procesos de fusión. Modificada de Moreno *et al.*, (2021).

*Figure 2. (Left) Simplified scheme with the position of the 100 samples collected along the slope of Monte Perdido glacier (red line I-II marks the studied profile; identification of the samples is MP-0 to MP-100). According to the ice bedding (tilt is approximate) the oldest material should be found at the bottom of the lower glacier. Note the inset with a detailed view of the sampling procedure measuring a height difference of 1 m to obtain every sample. (Right) Age model for the Monte Perdido ice sequence based on linear interpolation of ^{14}C data (Table 2), obtained using the Clam software (Blaauw, 2010; Blaauw *et al.*, 2019). Vertical axis indicates the number of samples from MP-0 to MP-100 in coherence with left figure. The dates appear as the calendar-age probability distributions in blue, while the black line is the resulting depth-age model and the gray envelope shows the 95 % confidence interval. An interval interpreted as a period with low ice accumulation is indicated by a gray band. Modified from Moreno *et al.*, (2021).*

El método de datación más utilizado para fechar el hielo es el conteo de sus láminas anuales (Festi *et al.*, 2017). En el caso del glaciar de Monte Perdido, y de muchos otros en zonas templadas y tropicales, donde la acumulación de hielo es mínima o el hielo está muy deformado, hay que obtener las dataciones a partir de otros métodos, en general más complejos y con mayor incertidumbre. En el caso del glaciar de Monte Perdido, en primer lugar, se muestreó el hielo actual mediante la obtención de pequeños cilindros de hielo (100 muestras de 6 cm de diámetro y 25 cm de longitud) a lo largo de un transecto altitudinal, donde se observa la estratigrafía primaria marcada por capas ricas en detritos

(Figura 2). El transecto está localizado en la zona de ablación actual, que ha sido erosionada hasta tener una pendiente de 20° .

Posteriormente se decidió datar el techo de la secuencia, es decir, las muestras de hielo más recientes, por la técnica del Cs^{137} de cara a determinar si correspondía o no con la época actual. El enriquecimiento en la atmósfera (y posteriormente en muchos registros paleoambientales) en el isótopo Cs^{137} , se asocia a las pruebas nucleares que tuvieron lugar en los años 50 y 60 del siglo pasado, así como a los accidentes de Chernobyl (en 1986) y de Fukushima (en 2011). En el glaciar de Monte Perdido, se analizaron cinco muestras a techo

de la secuencia por espectrometría- γ con resultado negativo, es decir, ninguna muestra mostró concentraciones de Cs^{137} para indicar que la muestra era actual o reciente.

Para confirmar estos resultados tan sorprendentes, se muestrearon un total de 10 cilindros de hielo para el análisis de Pb^{210} como método independiente, lo que permitiría datar aproximadamente los últimos 100-200 años del hielo del glaciar (Eichler *et al.*, 2000; Herren *et al.*, 2013). La determinación de la actividad del Pb^{210} se llevó a cabo mediante la medida del nucleido “hijo”, Po^{210} , por espectrometría- α siguiendo la metodología descrita en (Sanchez-Cabeza *et al.*, 1998). De nuevo, los resultados de esta técnica, al no encontrar Pb en exceso, permitieron afirmar que los últimos 100-200 años de nuestra historia no estaban registrados en el hielo actual de Monte Perdido, asumiendo así que la fusión actual había hecho desaparecer el hielo de parte de la PEH.

Una vez se supo que se contaba con un hielo mucho más antiguo de lo que se esperaba inicialmente, se procedió a datar los escasos restos orgánicos que habían quedado atrapados en las capas de hielo mediante radiocarbono. Así, en la secuencia de Monte Perdido se obtuvieron 16 dataciones por C^{14} AMS, combinando las que utilizaron (i) materia orgánica sin determinar (9 muestras), (ii) polen concentrado (3 muestras), (iii) sedimento acumulado en filtros (2 muestras) y (iv) carbono orgánico insoluble (WIOC, water-insoluble organic carbon) (2 muestras) (Tabla 2). A continuación, se explica el método y el resultado obtenido de los cuatro tipos de muestras datados por radiocarbono:

(i) Materia orgánica sin determinar. Mediante una lupa binocular se extrajeron las partículas orgánicas que, debido a su pequeño tamaño, no pudieron ser identificadas. De estas 9 muestras, salvo una de ellas en la que se identificaron pequeños trozos de plástico como contaminación en el muestreo, el resto se incorporaron al modelo de edad.

(ii) Polen. Los concentrados de polen se prepararon en tres muestras para completar y replicar los resultados anteriores. La preparación siguió el método estándar, incluyendo un tratamiento químico y una separación mineral por líquido denso (Moore *et al.*, 1991). Los posibles efectos de percolación del polen en este tipo de registros no se conocen bien, pero algunos autores cuestionan el uso del polen para datar sondeos de hielo (Ewing *et al.*, 2014), mientras que otros lo dan como método válido (Festi *et al.*, 2017). En nuestro caso, las tres muestras ofrecieron dataciones muy antiguas, incoherentes con las anteriores, y fueron descartadas aduciendo a posibles efectos de re-deposición de material polínico más antiguo.

(iii) Sedimento acumulado en filtros. En dos de las capas más ricas en detritos, se filtró el material usando una línea de filtración conectada a una bomba de vacío y usando filtros de fibra de cuarzo. Se obtuvo mucho sedimento, pero sin poder controlar su tipo ni su origen. Los resultados de ambas muestras fueron inválidos, probablemente como consecuencia de la mezcla de materiales de distinta edad.

(iv) WIOC. Debido a que los fragmentos orgánicos (plantas, madera, insectos) son muy difíciles de encontrar en los glaciares de montaña, se ha desarrollado recientemente un nuevo método de datación que se basa en extraer cantidades ínfimas del carbono orgánico insoluble en agua de los aerosoles carbonáceos que se encuentran en la matriz del hielo (Uglietti *et al.*, 2016). Se enviaron dos muestras al Laboratorio del Instituto Paul Scherrer de Suiza, donde eliminaron la parte externa de los cilindros de hielo para descontaminar y usaron el procedimiento allí desarrollado para su datación (Jenk *et al.*, 2009). En ambos casos, se obtuvieron resultados con un error muy alto debido a la escasa materia orgánica encontrada. Aun así, una de las dos muestras pudo utilizarse para el modelo de edad (Tabla 2).

Tabla 2: Dataciones de radiocarbono de las muestras del glaciar de Monte Perdido indicando su origen, la edad de radiocarbono (edad C¹⁴) y la edad calibrada usando INTCAL13 y presentada en años calendario (CE Common Era en inglés). Las muestras en cursiva no se incluyeron en el modelo de edad (en la columna “comentarios” se explica la razón).

Table 2: Radiocarbon dating of Monte Perdido glacier samples indicating their origin, the radiocarbon age (¹⁴C age BP) and the calibrated date using INTCAL13 curve and presented in calendar years Common Era (CE). Samples in italics were not included in the depth-age model (see column “comments” and text for explanation).

ORIGEN	ETIQUETA MUESTRA	CÓDIGO LABORATORIO	EDAD C ¹⁴ BP	EDAD CALIBRADA (CE)	COMENTARIOS
Materia orgánica sin determinar	MP-1	D-AMS 025291	2000±64	8±66	Utilizada en el modelo de edad
	MP-42	D-AMS 025294	1554±27	462±32	Utilizada en el modelo de edad
	MP-48	D-AMS 025295	73±33	<i>1897±20</i>	<i>Descartada por contaminación con plástico</i>
	MP-67	D-AMS 025296	876±29	1185±31	Utilizada en el modelo de edad
	MP-68	D-AMS 026592	1128±22	942±24	Utilizada en el modelo de edad
	MP-69	D-AMS 026593	1230±23	730±14	Utilizada en el modelo de edad
	MP-70	D-AMS 025297	1308±28	680±16	Utilizada en el modelo de edad
	MP-73	D-AMS 025298	1011±25	1012±16	Utilizada en el modelo de edad
	MP-100	D-AMS 025299	923±39	1074±31	Utilizada en el modelo de edad
Material filtrado	MP-67filtro	D-AMS 029894	485±40	<i>1429±15</i>	<i>Descartadas por mezcla con fracción detrítica</i>
	MP-81filtro	D-AMS 033972	1758±25	<i>287±68</i>	
WIOC	MP10m	MP10m	812±755	<i>854±721</i>	<i>Descartada por el alto error</i>
	MP59m	MP59m	926±268	1046±242	Utilizada en el modelo de edad
Concentrados de polen	MP-30polen	D-AMS 031464	3906±42	<i>-2384±1332</i>	<i>Descartadas por los altos errores y problemas técnicos de percolación</i>
	MP-70polen	D-AMS 031465	1787±37	<i>237±255</i>	
	MP-100polen	D-AMS 031466	1854±30	<i>158±807</i>	

3. Producir un marco cronológico robusto: modelización bayesiana y tradicional

No existe una receta única para la producción de un modelo de edad; existen diferentes factores que nos ayudan a elegir qué método es

el mejor para cada conjunto de dataciones y el tipo de registro en cuestión. Algo que, sin embargo, sí que debería ser universal es la aceptación de que un modelo es una representación de la realidad, y no la realidad en sí misma y que, por tanto, es muy necesario

incluir en todos los modelos su incertidumbre. Este último aspecto se tiende a obviar en las reconstrucciones paleoambientales en las que, demasiado a menudo, se olvida que un modelo, como tal, ha de llevar una incertidumbre asociada puesto que nunca se puede tomar como una entidad real (Buck y Juárez, 2020). Una consecuencia frecuente de esto es la producción de correlaciones numéricas entre series de indicadores ambientales (proxies) provenientes de diferentes registros, y con diferentes modelos de edad, que acaban en conclusiones necesariamente espurias.

En cada uno de los casos que aquí se presentan se han empleado aproximaciones metodológicas diferentes que dan lugar al mejor modelo de edad-profundidad posible, optimizando la relación entre el número de dataciones absolutas, las características de sedimentación del registro y el conocimiento experto sobre las secuencias en cada caso.

3.1. El modelo de edad de Villarquemado

El modelo de edad-profundidad en la secuencia de El Cañizar de Villarquemado pudo llevarse a cabo utilizando finalmente un total de 33 muestras válidas, obtenidas a partir de 3 técnicas de datación diferentes (Figura 1). Producir un modelo de edad coherente y robusto, en este caso, implicó retos en dos frentes esencialmente: 1) un número de dataciones absolutas relativamente pequeño frente a la longitud del sondeo, y 2) la muy variable distribución del error de cada una de estas dataciones, y sus diferentes requerimientos de calibración a edades de calendario (sólo las dataciones de radiocarbono lo requieren), para producir un perfil de incertidumbre consistente con las dataciones. Por ello se eligió usar la inferencia bayesiana, a través del paquete de R *rbacon* v1.2 (Blaauw *et al.*, 2021), actualmente en su versión 2.5.7, porque permitía la flexibilidad necesaria para producir un modelo de edad en el que se acomodara un número relativamente pequeño de dataciones, con errores relativamente grandes (Blaauw y Christen, 2011). Como se

mencionaba anteriormente, la inferencia bayesiana implica una aproximación numérica muy diferente a la probabilidad tradicional: en la primera, se observa la realidad, se estima la probabilidad del suceso analizado, y se actualiza esa probabilidad con nueva información que se pueda adquirir si el experimento se va repitiendo, o con información de la que se disponga “*a priori*”. Esto es precisamente lo que hace el proceso iterativo de cadenas de Markov que reproduce la modelización bayesiana (de sus siglas en inglés MCMC - Markov Chains Monte Carlo), a través de un proceso semi-aleatorio ajustado a una regresión gamma (Blaauw y Christen 2011). En este flujo de trabajo existe un número de decisiones a tomar sobre la frecuencia en la que se quiere renovar el proceso MCMC, o lo que es lo mismo, en cuántas secciones se presume que pueden cambiar los parámetros de modelización. Estos parámetros condicionan el proceso iterativo bayesiano, de manera que los valores “*a priori*” se convierten en muy relevantes.

En el modelo de edad de la secuencia de Villarquemado se tenía poca información *a priori* sobre las tasas de sedimentación de la secuencia, así que una innovación metodológica que consideramos útil para otros grupos de investigación fue realizar un análisis de sensibilidad sobre dos de los parámetros del modelo referentes a la acumulación del depósito (*acc.shape*, que se refiere a la forma de la distribución gamma que rige la acumulación, y *acc. Mean*, que determina el valor medio de la función). Este análisis de sensibilidad implicó combinar un rango de valores para esos parámetros, generando varios modelos diferentes, para cada combinación posible. Determinar qué conjunto de valores era el óptimo, implicó extraer una datación en cada combinación, y evaluar la capacidad predictiva de cada modelo sobre esa datación. Esta aproximación de validación cruzada (también llamada “*leave-one-out*”), se encuentra detallada en el material suplementario de Valero-Garcés *et al.* (2019) y en este repositorio Zenodo (10.5281/zenodo.6371364). Con todo ello, finalmente, el modelo de edad obtenido

en el registro de El Cañizar de Villarquemado recoge, de la manera más parsimoniosa posible considerando el error de las dataciones, los últimos 135.000 años de variabilidad ambiental.

3.2. El modelo de edad del Monte Perdido

Para inferir la cronología del glaciar de Monte Perdido se utilizaron finalmente 9 dataciones de radiocarbono. En este caso, el mayor reto era combinar dataciones a lo largo de una secuencia de hielo, cuya dinámica de acumulación puede no ser comparable a la de un sedimento lacustre, por ejemplo, puesto que puede presentar hiatos debido a fases ablación. De hecho, como se observa en la Figura 2, la estratigrafía del hielo glaciar ya apuntaba unas tasas de acumulación de hielo muy diferentes a lo largo de la secuencia estudiada, marcándose claramente una zona (aproximadamente hacia el metro 70), donde las capas ricas en sedimentos detríticos, polvo y materia orgánica se amalgaman, apareciendo así una zona más oscura en el perfil del hielo. Este hecho nos indica que, muy probablemente, en ese periodo de tiempo que posteriormente se observa con las dataciones que corresponde con la Anomalía Climática Medieval, predominaba la ablación frente a la acumulación de hielo. De ahí que en unos pocos metros (a 65-75 m desde la base) tengamos dataciones que abarcan un gran periodo de tiempo (“zona de condensación”, en la Figura 2).

En este caso, se eligió emplear un ajuste estadístico tradicional a través de una regresión lineal, empleando el paquete de R Clam v2.2 (Blaauw, 2010; Blaauw *et al.*, 2021). Como se ha indicado anteriormente, se sospechaba que había alteraciones en la continuidad de la sedimentación, con posibles periodos de tiempo en los que la acumulación de sedimento, o su preservación, se habrían alterado por procesos ajenos a la toma de muestras. Se eligió, por tanto, realizar una regresión lineal que permitiera el ajuste de las dataciones a un modelo lineal, preservando, por una

parte, la incertidumbre de cada datación, y por otra, evitando simular cambios en la tasa de sedimentación que podían no ser reales. Los parámetros y el conjunto de dataciones para poder reproducir el modelo de edad del hielo de Monte Perdido, se pueden encontrar en este repositorio de Zenodo (10.5281/zenodo.3886911).

4. Resultados y Discusión. Ejemplos de modelos de edad combinados en nuestro territorio

4.1. El Cañizar de Villarquemado

El robusto modelo de edad conseguido para el registro de El Cañizar de Villarquemado, ha permitido enmarcar cronológicamente, y con la mayor precisión posible permitida por el modelo, una historia paleoambiental y una dinámica y composición de la vegetación únicas en el sur de Europa. Nos enfrentamos a una secuencia palinológica compleja, que se desmarcaba de todo lo conocido hasta el momento para el Mediterráneo occidental, por lo que sin el apoyo cronológico independiente que ha ofrecido el modelo de edad multimétodo construido, no hubiera sido posible llevar a cabo una interpretación correcta de los resultados. Así, podemos afirmar, por ejemplo, que el predominio de comunidades resilientes de *Juniperus* en el paisaje vegetal del interior de Iberia perduró desde finales del MIS 6 (135-130 ka BP) y durante todo el MIS 5 (130-71 ka BP), desapareciendo, sólo, con la llegada del MIS 4 (71-57 ka BP) (Figura 3). A priori, un paisaje inesperado que, hasta el momento, no se ha registrado en ningún otro punto de la cuenca Mediterránea con esta cronología. Sí existen situaciones comparables durante periodos glaciales del Pleistoceno medio (en la secuencia de Lago Grande di Monticchio, Italia, por ejemplo; Allen y Huntley, 2009), pero en ningún caso durante el Pleistoceno superior, ni siendo el principal elemento forestal durante el Eemiense, y el de las otras dos fases de expansión de leñosas ocurridas durante el MIS 5 (en el MIS 5c y 5a,

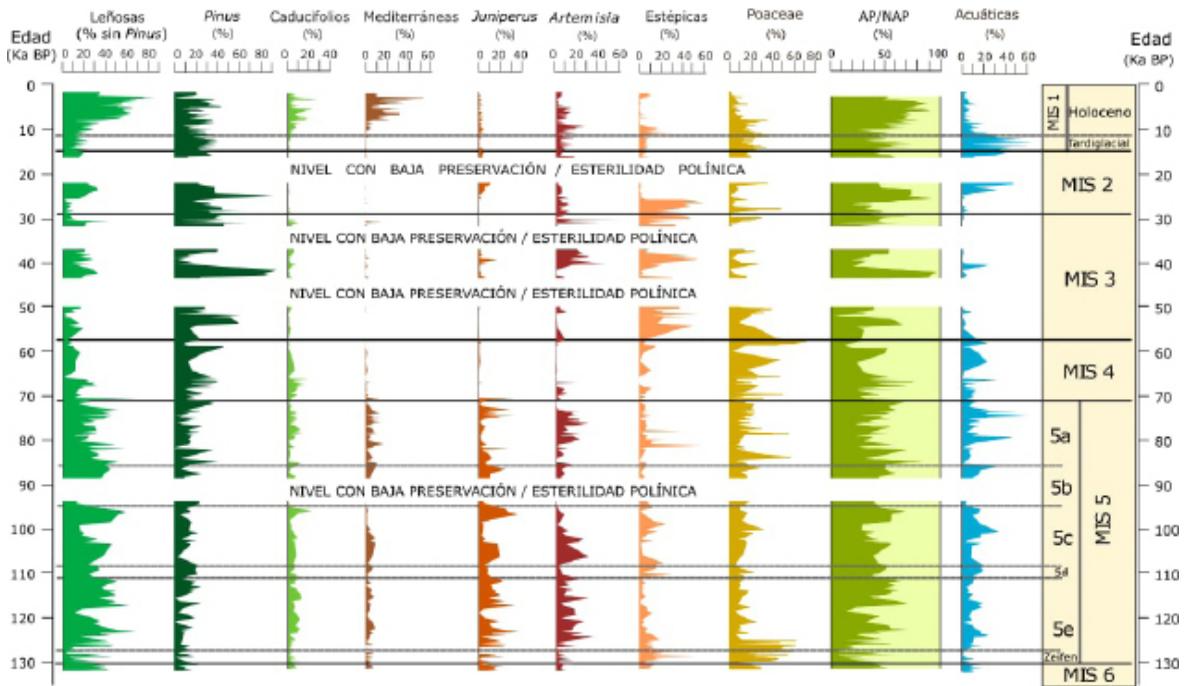


Figura 3. Diagrama palinológico de la secuencia de El Cañizar de Villarquemado con una selección de taxones o grupos de taxones, representados en edad ka BP (para conocer composición de las curvas de Leñosas, Caducifolios, plantas Mediterráneas, Estépicos y Acuáticas, ver González-Sampérez *et al.*, 2020, incluido todo el material suplementario al artículo). En el gráfico también se indican los 4 episodios de esterilidad o baja preservación polínica con sendas bandas blancas que interrumpen las curvas de los espectros palinológicos, así como, a la derecha, los límites de los estadios isotópicos marinos (MIS 6 a 1) y sub-periodos paleoclimáticos. Modificada de González-Sampérez *et al.*, (2020).

Figure 3. Palynological diagram of the sequence of El Cañizar de Villarquemado with a selection of taxa or groups of taxa, represented in age ka BP (for the composition of the curves of Woody, Deciduous, Mediterranean, Steppe and Aquatic plants, see González-Sampérez *et al.*, 2020, including all supplementary material to the article). The graph also shows the 4 episodes of sterility or low pollen preservation with white bands that interrupt the curves of the palynological spectra, as well as, on the right, the limits of the marine isotopic stages (MIS 6 to 1) and sub-paleoclimatic periods. Modified from González-Sampérez *et al.*, (2020).

además de en el 5e: González-Sampérez *et al.*, 2020).

Este dominio de *Juniperus*, acompañado de *Artemisia* siguiendo la misma variabilidad, es comparable con las comunidades vegetales existentes hoy en día en las tierras altas del interior de Iberia entre 900-1200 m s.n.m. (Sainz Ollero y van Staalduinen, 2012), como resultado de una continentalidad climática muy acusada. Los extremos de temperaturas máximas y mínimas resultantes de la amplitud de las curvas de insolación de verano e invierno durante ese periodo, propiciarían estas formaciones vegetales, sometidas, además, a una evapotranspiración muy intensa que implicaría un déficit hídrico estival sufi-

cientemente considerable como para impedir la tradicional expansión de caducifolios registrada en las secuencias Mediterráneas de referencia durante los episodios forestales del MIS 5 (i.e., Magri, 1999; Tzedakis *et al.*, 2006; Allen y Huntley, 2009; Sadori *et al.*, 2016). En Villarquemado, sin embargo, sólo se registran tímidos porcentajes de caducifolios en comparación a las coníferas, pero cronológicamente, no hay duda, se trata del interglacial.

Del mismo modo, haber conseguido un modelo de edad robusto y con esta precisión cronológica, nos ha permitido precisar que las condiciones más secas de todo el registro, identificadas por las facies sedimentarias y espectros palinológicos, ocurrieron durante

la segunda parte de MIS 4, mientras que la primera fue relativamente húmeda, con persistencia de caducifolios tolerantes al frío, y durante todo el MIS 3 (57-29 ka BP), cuando los abanicos aluviales progradaron con facies finales distales sobre las facies lacustres y dominaba la vegetación estépica.

Como corolario, se observa que, a pesar de la incertidumbre asociada a la distribución del error de las dataciones, la inferencia bayesiana y, especialmente, nuestro análisis de sensibilidad permite asignar una edad para cada cm de la secuencia de manera robusta. Esta aproximación numérica permite tener un nivel de confianza alto en los cambios que se observan en la tasa de sedimentación a lo largo de la secuencia, independientemente de la incertidumbre del modelo. El Cañizar de Villarquemado se convierte, gracias a este desarrollo metodológico, en el registro paleolacustre mejor datado hasta el momento en Iberia para el Pleistoceno superior.

4.2. El Glaciar de Monte Perdido

El modelo de edad del glaciar de Monte Perdido representa la primera cronología de un glaciar en la península Ibérica. Gracias a un esfuerzo importante llevado a cabo en el proyecto EXPLORA Paleo ICE, y a combinar técnicas de datación, se pudieron extraer conclusiones muy novedosas sobre la evolución de este glaciar (Figura 4).

Así, el primer resultado relevante es que la edad más antigua localizada en la base de la secuencia corresponde con el Periodo Romano. Este dato indica que, al menos desde la época Romana, un glaciar coronaba las cimas del actual Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. Es esperable que ese glaciar tuviera una extensión menor que en el periodo frío del Neoglacial, hace aproximadamente 6000 años, cuando su tamaño viene indicado por la posición de la morrena más exterior (Figura 4A). El siguiente dato de interés, es que el glaciar no desapareció durante la Anomalía Climática Medieval, puesto que encontramos

hielo datado de ese periodo, y anteriores. Sin embargo, sí que podemos afirmar que el glaciar estaría muy reducido (Figura 4B), debido a la concentración de capas oscuras ricas en materia orgánica y detritos que, en muy poco espesor, albergan varios siglos de la Edad Media. Gracias a las morrenas de la PEH sabemos que el glaciar volvió a avanzar durante ese periodo (Figura 4C), pero no encontramos en la actualidad hielo de esa época (Figura 4D). Es por tanto relevante señalar que hoy en día no están preservados los últimos 500-600 años de historia en el hielo del glaciar de Monte Perdido. Eso implica que el hielo de la PEH, y el que se haya acumulado desde entonces, se ha fundido y desaparecido completamente.

Este hecho muestra, de manera fehaciente, que la fusión de estas últimas décadas está ocurriendo a pasos agigantados, y que la situación del glaciar de Monte Perdido hoy en día, no es, en ningún modo, semejante a la de otros periodos cálidos anteriores, como la Anomalía Climática Medieval (cuando el glaciar se redujo, pero no desapareció). Estudios paleoambientales como éste, con un fuerte apoyo de los datos en un modelo de edad robusto e independiente, ayudan a establecer un marco temporal al calentamiento actual y contextualizar, en este caso en los últimos 2000 años, la evolución de un glaciar hoy en vías de desaparición.

5. Conclusiones

Enfrentarse al reto de obtener una buena cronología en un estudio paleoambiental Cuaternario se convierte muchas veces en un largo y complejo proceso que precisa de tiempo, financiación, colaboración y aproximaciones multi-método ingeniosas. "Cronología extrema: generación de modelos cronológicos robustos cuando todo está en contra", es una muestra de parte de ello, basada en los ejemplos de la Laguna del Cañizar de Villarquemado (135.000 años de variada e inesperada historia de la vegetación en el interior del NE peninsular), y el glaciar de Monte Perdido (icónico y complejo depósito de hielo del Piri-

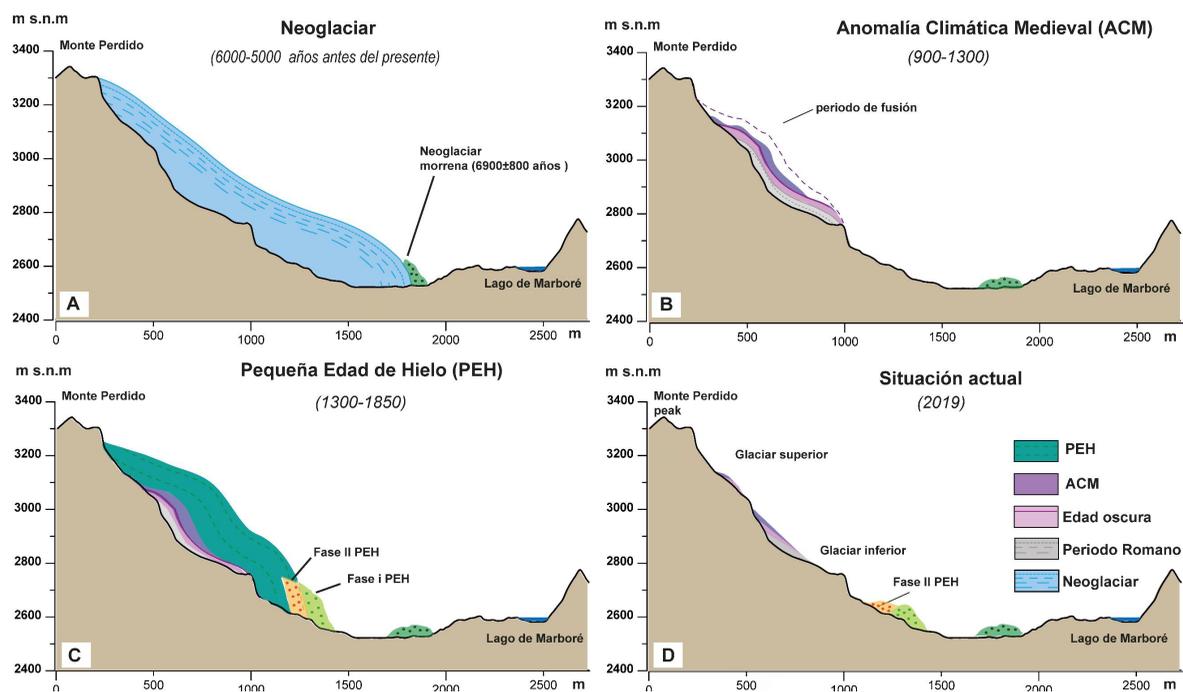


Figura 4. Transectos esquemáticos (de sur a norte) del circo de Marboré, mostrando de modo tentativo la reconstrucción del glaciar de Monte Perdido en cuatro etapas de su evolución. A) periodo Neoglacial (aproximadamente, hace 6000-5000 años, donde se indica la morrena (García-Ruiz *et al.*, 2020). Esta figura representa el máximo avance glaciar durante el periodo Neoglacial. (B) Anomalía Climática Medieval (ACM, 900 -1300 años CE), un periodo en el que el glaciar retrocedió y la ablación causó la concentración de restos orgánicos formando capas oscuras en el hielo glaciar. (C) Pequeña Edad de Hielo (PEH, 1300 - 1850 años CE) cuando el glaciar alcanzaba la posición de las morrenas de la PEH, representando así su máximo avance durante ese periodo frío. (D) Situación actual, caracterizada por la división en dos cuerpos del glaciar de Monte Perdido, la fusión total del hielo de la PEH y las pendientes pronunciadas causadas por la fusión. Modificada de Moreno *et al.*, (2021).

*Figure 4. Schematic geomorphic transects (south to north) taken from the Marboré Cirque, showing the tentative reconstruction of Monte Perdido glacier during four main stages. A) Neoglacial Period (ca. 5000 - 6000 cal yr BP) where the Neoglacial moraine is indicated (García-Ruiz *et al.*, 2020). This figure represents the state of maximum glacier advance during the Neoglacial period. (B) Medieval Climate Anomaly (900-1300 CE), a period when the glacier retreated and ablation caused a concentration of debris and organic remains form dark layers in the glacier ice. (C) Little Ice Age (1300-1850 CE), with the MPG reaching the LIA moraines position, thus represented at its maximum advance during that period. (D) Present-day situation characterized by the MPG divided into two ice bodies, no ice remaining from the LIA, and very steep slopes. Modified from Moreno *et al.*, (2021).*

neo central sometido a avances, retrocesos e importantes pérdidas por deshielo a lo largo de su historia).

Partiendo de la incontestable necesidad (y obligación) de acotar cronológicamente estos y todos los registros paleoclimáticos de forma robusta, contando con evidencias independientes y no por comparación o “tuning” (en inglés), este trabajo muestra lo importante que resulta poder combinar distintas técnicas de datación y diferentes tipos de mues-

tras si es necesario, y posible, y el modo más adecuado de hacerlo. Esto es, el cómo, el por qué, y el para qué, incluyendo los fracasos o resultados no válidos. Sólo consiguiendo un buen modelo de edad-profundidad podemos conocer con seguridad y precisión la rapidez de las transiciones climáticas del pasado, calibrar la respuesta de diferentes ecosistemas ante un cambio ambiental o establecer la sincronía-asincronía con la que ocurren ciertos cambios en zonas alejadas del planeta, pero quizá interconectadas.

Sumar a la complejidad de la investigación paleoclimática y/o paleoambiental, hipótesis fundamentadas en cronologías pobres, no ayuda al avance del conocimiento, y no es algo que nos podamos permitir. Al contrario. Así, un conocimiento experto, conseguido a partir de equipos multidisciplinares y aproximaciones metodológicas variadas, que incluyen diferentes sistemas de dataciones, márgenes de error variados y sistemas de calibración distintos, es difícil pero posible, incorporando una inferencia bayesiana, por ejemplo. Sirvan este trabajo, y los dos casos expuestos en él, como ejemplo y objetivo mismo, de cualquier estudio en registros Cuaternarios.

Agradecimientos

Se agradece la financiación a la Agencia Española de Investigación (AEI) y al Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER) mediante los proyectos PYCACHU (PID2019-106050RB-I00), DINAMO3 (CGL2015-69160-R), DINAMO2 (CGL2012-33063), DINAMO (CGL2009-07992) y PaleolCE EXPLORA (CGL2015-72167-EXP), así como a todas las personas que ayudaron en el trabajo de campo y en el posterior análisis e interpretación de los datos obtenidos en ambas secuencias paleoambientales. Esta es una contribución del Grupo del Gobierno de Aragón "Geomorfología y Cambio Global" (ref E02-20R).

Bibliografía

- Allen, J.R.M., Huntley, B., (2009). Last Interglacial palaeovegetation, palaeoenvironments and chronology: a new record from Lago Grande di Monticchio, southern Italy. *Quaternary Science Reviews* 28, 1521-1538. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.013>
- Aranbarri, J., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B., Moreno, A., Gil-Romera, G., Sevilla-Callejo, M., García-Prieto, E., Di Rita, F., Mata, M.P., Morellón, M., Magri, D., Rodríguez-Lázaro, J., Carrión, J.S., (2014). Rapid climatic changes and resilient vegetation during the Lateglacial and Holocene in a continental region of southwestern Europe. *Global and Planetary Change* 114, 50-65. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.003>
- Baldini, J.U.L., Lechleitner, F.A., Breitenbach, S.F.M., van Hunen, J., Baldini, L.M., Wynn, P.M., Jamieson, R.A., Ridley, H.E., Baker, A.J., Walczak, I.W., Fohlmeister, J., (2021). Detecting and quantifying palaeoseasonality in stalagmites using geochemical and modelling approaches. *Quaternary Science Reviews* 254, 106784. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106784>
- Bayes, T., Price, I, (1763). LII. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, A. M. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53, 370-418. <https://doi.org/10.1098/rstl.1763.0053>
- Blaauw, M., (2010). Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology* 5, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.01.002>
- Blaauw, M., Christen, J. Andres, López, M.A.A., Vázquez, J.E., González, Ó.M., Belding, T., Theiler, J., Gough, B., Karney, C., (2021). rbacon: Age-Depth Modelling using Bayesian Statistics. <https://cran.r-project.org/web/packages/rbacon/rbacon.pdf>
- Blaauw, M., Christen, J.A., (2011). Flexible Palaeoclimate Age-Depth Models Using an Autoregressive Gamma Process. *Bayesian Analysis* 6, 457-474. <https://doi.org/10.1214/ba/1339616472>
- Blaauw, M., Christen, J.A., Vázquez, J.E., Goring, S., 2021. clam: Classical Age-Depth Modelling of Cores from Deposits. CRAN (2019). URL <https://CRAN.R-project.org/package=clam>
- Brauer, A., Hajdas, I., Blockley, S.P.E., Bronk Ramsey, C., Christl, M., Ivy-Ochs, S., Moseley, G.E., Nowaczyk, N.N., Rasmussen, S.O., Roberts, H.M., Spötl, C., Staff, R.A., Svensson, A., (2014). The importance of independent chronology in integrating records of past climate change for the 60-8 ka INTIMATE time interval. *Quaternary Science Reviews*, 106, 47-66. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.07.006>
- Buck, C.E., Juárez, M.A., (2020). Modelización bayesiana de radiocarbono para principiantes, in: Métodos cronométricos en arqueología, prehistoria y paleontología, 2020, ISBN 978-84-17946-34-0, págs. 297-314. <https://eprints.whiterose.ac.uk/174268/>
- Eichler, A., Schwikowski, M., Gäggeler, H.W., Furrer, V., Synal, H.-A., Beer, J., Saurer, M., Funk, M., (2000). Glaciochemical dating of an ice core from upper Grenzgletscher (4200 m a.s.l.).

- Journal of Glaciology* 46, 507-515. <https://doi.org/10.3189/172756500781833098>
- Ewing, M.E., Reese, C.A., Nolan, M.A., (2014). The potential effects of percolating snowmelt on palynological records from firn and glacier ice. *Journal of Glaciology* 60, 661-669. <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J158>
- Festi, D., Carturan, L., Kofler, W., dalla Fontana, G., de Blasi, F., Cazorzi, F., Bucher, E., Mair, V., Gabrielli, P., Oeggli, K., (2017). Linking pollen deposition and snow accumulation on the Alto dell'Ortles glacier (South Tyrol, Italy) for sub-seasonal dating of a firn temperate core. *The Cryosphere* 11, 937-948. <https://doi.org/10.5194/tc-11-937-2017>
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., Andrés, N. de, Valero-Garcés, B.L., López-Moreno, J.I., Sanjuán, Y., (2014). Holocene and 'Little Ice Age' glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. *The Holocene* 24, 1439-1452. <https://doi.org/10.1177/0959683614544053>
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., Andrés, N., López-Moreno, J.I., (2020). Neoglaciation in the Spanish Pyrenees: a multiproxy challenge. *Med. Geosc. Rev.* 2, 21-36. <https://doi.org/10.1007/s42990-020-00022-9>
- González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., García-Prieto, E., Aranbarri, J., Moreno, A., Morellón, M., Sevilla-Callejo, M., Leunda, M., Santos, L., Franco-Múgica, F., Andrade, A., Carrión, J.S., Valero-Garcés, B.L., (2020). Strong continentality and effective moisture drove unforeseen vegetation dynamics since the last interglacial at inland Mediterranean areas: The Villarquemado sequence in NE Iberia. *Quaternary Science Reviews* 242, 106425. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106425>
- González-Sampériz, P., Leroy, S.A.G., Carrión, J.S., Fernández, S., García-Antón, M., Gil-García, M.J., Uzquiano, P., Valero-Garcés, B., Figueiral, I., (2010). Steppes, savannahs, forests and phytodiversity reservoirs during the Pleistocene in the Iberian Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology*, Iberian Floras through Time: Land of Diversity and Survival 162, 427-457. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2010.03.009>
- Hajdas, I., (2008). Radiocarbon dating and its applications in Quaternary studies. *E&G Quaternary Sci. J.* 57, 2-24. <https://doi.org/10.3285/eg.57.1-2.1>
- Herren, P.-A., Eichler, A., Machguth, H., Papina, T., Tobler, L., Zapf, A., Schwikowski, M., (2013). The onset of Neoglaciation 6000 years ago in western Mongolia revealed by an ice core from the Tsambagarav mountain range. *Quaternary Science Reviews* 69, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.02.025>
- Jenk, T.M., Szidat, S., Bolius, D., Sigl, M., Gägger, H.W., Wacker, L., Ruff, M., Barbante, C., Boutron, C.F., Schwikowski, M., (2009). A novel radiocarbon dating technique applied to an ice core from the Alps indicating late Pleistocene ages. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114. <https://doi.org/10.1029/2009JD011860>
- Leunda, M., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Bartolomé, M., Belmonte-Ribas, Á., Gómez-García, D., Kaltenrieder, P., Rubiales, J.M., Schwörer, C., Tinner, W., Morales-Molino, C., Sancho, C., (2019). Ice cave reveals environmental forcing of long-term Pyrenean tree line dynamics. *Journal of Ecology* 107, 814-828. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13077>
- Lian, O.B., Roberts, R.G., (2006). Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews*, Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments 25, 2449-2468. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.11.013>
- López-Moreno, J.I., Alonso-González, E., Monserat, O., Del Río, L.M., Otero, J., Lapazaran, J., Luzi, G., Dematteis, N., Serreta, A., Rico, I., Serrano-Cañadas, E., Bartolomé, M., Moreno, A., Buisan, S., Revuelto, J., (2019). Ground-based remote-sensing techniques for diagnosis of the current state and recent evolution of the Monte Perdido Glacier, Spanish Pyrenees. *J. Glaciol.* 65, 85-100. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.96>
- López-Moreno, J.I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Alonso-González, E., García-Ruiz, J.M., (2016). Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere* 10, 681-694. <https://doi.org/10.5194/tc-10-681-2016>
- Magri, D., (1999). Late Quaternary vegetation history at Lagaccione near Lago di Bolsena (central Italy). *Review of Palaeobotany and Palynology* 106, 171-208. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(99\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(99)00006-8)
- Moore, P.D., Webb, J.A., Collinson, M.E., (1991). *Pollen Analysis*, Second. ed. Blackwell Scientific Publications.
- Moreno, A., Bartolomé, M., López-Moreno, J.I., Pey, J., Corella, J.P., García-Orellana, J., Sancho, C., Leunda, M., Gil-Romera, G., González-

- Sampériz, P., Pérez-Mejías, C., Navarro, F., Otero-García, J., Lapazaran, J., Alonso-González, E., Cid, C., López-Martínez, J., Oliva-Urcia, B., Faria, S.H., Sierra, M.J., Millán, R., Querol, X., Alastuey, A., García-Ruiz, J.M., (2021). The case of a southern European glacier which survived Roman and medieval warm periods but is disappearing under recent warming. *The Cryosphere* 15, 1157-1172. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1157-2021>
- Osete, M.-L., Martín-Chivelet, J., Rossi, C., Edwards, R.L., Egli, R., Muñoz-García, M.B., Wang, X., Pavón-Carrasco, F.J., Heller, F., (2012). The Blake geomagnetic excursion recorded in a radiometrically dated speleothem. *Earth and Planetary Science Letters* 353-354, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.07.041>
- R Development Core Team, (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- R Studio CoreTeam, (2019). RStudio: Integrated Development for R. URL <http://www.rstudio.com/>
- Rubio, J. C. y Simón, J. L. (2007). Tectonic subsidence v. erosional lowering in a controversial intramontane depression: the Jiloca basin (Iberian Chain, Spain), *Geological Magazine*, 144, 127-141, <https://doi.org/10.1017/S0016756806002949>
- Sadori, L., Koutsodendris, A., Masi, A., Bertini, A., Combourieu-Nebout, N., Francke, A., Kouli, K., Joannin, S., Mercuri, A.M., Peyron, O., Torri, P., Wagner, B., Zanchetta, G., Sinopoli, G., Donders, T.H., (2016). Pollen-based paleoenvironmental and paleoclimatic change at Lake Ohrid (SE Europe) during the past 500 ka. *Biogeosciences* 13, 1423-1437. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1423-2016>
- Sainz Ollero, H., Van Staaldouin, M., (2012). Iberian steppes. In: Werger, M.J.A., van Staaldouin, M.A. (Eds.), Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World. Springer, Dordrecht, Netherland, pp. 273-288. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3886-7_9
- Sanchez-Cabeza, J.A., Masqué, P., Ani-Ragolta, I., (1998). 210Pb and 210Po analysis in sediments and soils by microwave acid digestion. *J Radioanal Nucl Chem* 227, 19-22. <https://doi.org/10.1007/BF02386425>
- Tzedakis, P.C., Hooghiemstra, H., Palike, H., (2006). The last 1.35 million years at Tenaghi Philippon: revised chronostratigraphy and long-term vegetation trends. *Quaternary Science Reviews* 25 (23-24), 3416-3430. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.09.002>
- Tylmann, W., Zolitschka, B., (2020). Annually Laminated Lake Sediments—Recent Progress. *Quaternary* 3, 5. <https://doi.org/10.3390/quat3010005>
- Uglietti, C., Zapf, A., Jenk, T.M., Sigl, M., Szidat, S., Salazar, G., Schwikowski, M., (2016). Radiocarbon dating of glacier ice: overview, optimisation, validation and potential. *The Cryosphere* 10, 3091-3105. <https://doi.org/10.5194/tc-10-3091-2016>
- Valero-Garcés, B.L., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Benito, B.M., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Aranbarri, J., García-Prieto, E., Frugone, M., Morellón, M., Arnold, L.J., Demuro, M., Hardiman, M., Blockley, S.P.E., Lane, C.S., (2019). A multi-dating approach to age-modelling long continental records: The 135 ka El Cañizar de Villarquemado sequence (NE Spain). *Quaternary Geochronology* 54, 101006. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2019.101006>

Recibido el 23 de marzo de 2022
Aceptado el 5 de septiembre de 2022

