

CRITERIOS PARA EVALUAR LA FIABILIDAD DE LAS CRONOLOGÍAS GLACIARES DEL ARCO MEDITERRÁNEO DURANTE LA MÁXIMA EXTENSIÓN DEL GLACIARISMO EN EL PLEISTOCENO SUPERIOR



D. Domínguez-Villar (1), R.M. Carrasco (2), J. Pedraza (3), J.K. Willenbring (4)

- (1) Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), 09002 Burgos, Spain. david.dominguez@cenieh.es
(2) Dpto. Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla-La Mancha, 45071 Toledo, Spain. rosa.carrasco@uclm.es
(3) Dpto. Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain. javierp@geo.ucm.es
(4) Dpto. Earth and Environmental Sciences, University of Pennsylvania, 19104-6313 Philadelphia, USA. erosion@upenn.edu

Abstract (Criteria for evaluating the reliability of glacier chronologies for the maximum glacier extension from the Mediterranean region during the Late Pleistocene): The technological advances on several dating techniques during the past decade have attracted back the attention to glacier studies, since if their records are accurately dated, they represent excellent paleoclimate archives. The age of the maximum extent of glaciers from the Mediterranean region has been under debate for over a decade, with reliability of glacier chronologies focusing most of the attention. The increase of glacier chronologies is not clarifying this debate but frequently adding noise that prevents identifying a regional paleoclimate pattern. We believe that the solution of this debate is not in increasing the number of studied sites but in evaluating their accuracy (quality vs. quantity). Therefore, here we suggest five criteria in order to assess the reliability of existing glacier chronologies. A limited number of chronologies satisfy this quality control, which highlights the importance of paying more attention to chronological methods in glacier studies.

Palabras clave: Cronología, fiabilidad, Glaciar, paleoclima
Key words: Chronology, Reliability, Glacier, paleoclimate

INTRODUCCIÓN

Los estudios del glaciario en la región mediterránea han proliferado en la última década gracias a la aplicación en este ámbito de los avances que se vienen realizando en diversas técnicas de datación. Se ha producido un incremento en la atención de los investigadores hacia los registros glaciares respecto a las décadas previas, producto del interés actual por el clima y la necesidad de entender las dinámicas del clima en el pasado. Así, el incremento de este tipo de estudios se ha producido una vez demostrada la viabilidad técnica de fechar sedimentos u otros indicadores geomorfológicos del registro glaciar.

En Europa, el glaciar de *Icesheet* Escandinavo (Rinterknecht et al., 2006) y buena parte del glaciario alpino (Ivy-Ochs et al., 2008) alcanzan sus máximas extensiones coincidiendo con el Último Máximo Glaciar a nivel global hace unos 21 ± 2 ka (Mix et al., 2001). Sin embargo, en los glaciares de montaña del arco mediterráneo las cronologías para el máximo glaciar son dispares aunque en algunos macizos parecen indicar un avance máximo anterior al Último Máximo Glaciar global (p.e., Giraudi, 2012). Se ha sugerido una causa paleoclimática que podría explicar este fenómeno debido al desplazamiento de la trayectoria de las tormentas hacia el sur del continente con anterioridad al Último Máximo Glaciar global (Florineth y Schlüchter, 2000). Aunque un balance de masa dominado por la precipitación más que por la temperatura podría explicar un avance temprano de los glaciares mediterráneos, esta hipótesis carece de una coherencia espacial con las cronologías glaciares existentes y una clara definición temporal que este acorde con el contexto paleoclimático del mediterráneo.

El amplio rango temporal de las cronologías glaciares para la máxima extensión de los hielos hace difícil conciliar los resultados de distintos grupos de investigación en diferentes macizos (Hugues y Woodward, 2008). Existen interpretaciones que pretenden explicar la disparidad de las cronologías en regiones próximas entre sí (p.e., Calvet et al., 2011) aludiendo a factores climáticos locales/regionales, aunque no se ven apoyadas por registros paleoclimáticos. Tal es la dispersión temporal proporcionada por las distintas cronologías, que registros de glaciario previamente asignados a la última glaciación pueden ser fechados por otros autores como pertenecientes a glaciaciones previas (Hughes et al., 2011). Sin embargo, el uso de distintos métodos de datación en áreas con cronologías dispares arroja una sospecha directa sobre su credibilidad (Pallàs et al., 2006).

En este trabajo se presentan cinco criterios que hemos considerado esenciales para la evaluación de la fiabilidad de una cronología glaciar. Nosotros consideramos que una cronología glaciar es robusta o fiable cuando satisface los cinco criterios. La identificación de cronologías robustas es esencial para entender el significado paleoclimático de los registros glaciares de las montañas mediterráneas, por lo que este tipo de análisis permitirá la eliminación de "ruido" en la base de datos ya existente.

METODOLOGÍA

Para valorar la fiabilidad de una cronología glaciar durante la máxima extensión de los glaciares se han considerado cinco criterios: 1, que el elemento datado represente el máximo glaciar; 2, que el método empleado ofrezca una exactitud adecuada; 3, que exista una replicabilidad de dataciones entorno al máximo; 4, que el resultado tenga sentido

geomorfológico, y finalmente, 5, que el resultado tenga sentido paleoclimático. En este control de fiabilidad no se tiene en cuenta la precisión de las mediciones, ni se han penalizado las dataciones indirectas del glaciario si existe una conexión clara con el glaciar (p.e., depósitos lacustres/turbosos postglaciares). A la hora de realizar el control de fiabilidad consideramos que no hay un método de datación mejor que otro y que su evaluación viene determinada por la satisfacción de los principios en los que se basa el método y la coherencia entre el evento que se quiere datar y la relación con el material seleccionado, es decir, el material muestreado significa realmente lo que nosotros interpretamos. A continuación desarrollamos los cinco criterios planteados:

1. Muestreo del máximo glaciar. Para datar el máximo glaciar se han de muestrear elementos que representen el máximo glaciar. A pesar de la sencillez de este axioma, es un criterio difícil de cumplir ya que con frecuencia la dinámica gravitacional, fluvial o periglacial ha borrado o alterado el registro del máximo glaciar que en ocasiones puede estar representado por indicadores poco definidos. La diferencia cronológica entre elementos geomorfológicos próximos entre sí (p.e., decenas de metros) puede ser de miles de años (Carrasco et al., 2012). Por lo tanto, es fundamental ser capaz de localizar sin lugar a duda los elementos más externos del paleoglaciario para el periodo que se pretende estudiar. La preservación deficiente del registro para su máxima extensión hace que en ocasiones las dataciones se realicen sobre elementos próximos a la máxima extensión (Pallàs et al., 2006), aunque estas cronologías no pueden considerarse indicadores del máximo glaciar.

2. Exactitud del método. Al aplicar cualquier método de datación se asumen una serie de circunstancias que permiten convertir un ratio isotópico, una dosimetría u otras variables en una edad. Sin embargo, con frecuencia no se respetan o tienen en cuenta esas circunstancias o principios que requiere cada técnica para ser aplicada. Aquí revisamos sucintamente las problemáticas más habituales en las técnicas de datación comúnmente aplicadas en paleoglaciares de la región mediterránea. Las dataciones por radiocarbono asumen que el ^{14}C proviene de la composición en equilibrio con la atmósfera en el momento de formación de la muestra. Por lo tanto, regiones calcáreas o con restos carbonosos antiguos que pueden aportar física o químicamente una fuente adicional de ^{14}C a nuestra muestra hacen que por lo general, ésta no pueda ser fiable. No obstante, aunque raramente utilizados, existen métodos que pueden minimizar este problema (Bordonau et al., 1993). Ya que en el área mediterránea los carbonatos son frecuentes en macizos montañosos, esta técnica no se recomienda en aquellas zonas, a no ser que el muestreo se realice en materiales que ofrezcan garantías de equilibrio atmosférico, como troncos de árboles (Monegato et al., 2007). El método de OSL requiere un blanqueo total de los granos analizados lo que requiere una efectiva exposición a la luz solar. No es una técnica muy apropiada en materiales glaciares donde los till y los depósitos fluviales subglaciares

nunca estuvieron expuestos a la luz solar durante su sedimentación. Por lo que ha de emplearse sobre sedimentos fluviales proglaciares en conexión geomorfológica con el máximo glaciar. Sin embargo, la turbidez producida por la harina glaciar en este tipo de ambientes hace necesaria la comparación de muestras de la misma terraza fluvial localizada decenas de kilómetros aguas abajo del glaciar o en cuencas no glaciadas donde el blanqueo de granos no estuviera comprometido. Para valorar adecuadamente el blanqueo de granos y poder considerar fiable la datación, las técnicas de *single-grain* son deseables frente a las *multi-grain*. Sin embargo, esta es una técnica muy apropiada para datar depósitos tipo *loess* que pudieran tener una relación directa con el glaciario (Lewis et al., 2009). El método de U-Th se ha empleado de forma directa o indirecta. La datación directa de cementos en morrenas es desaconsejable dada la posible incorporación de Torio detrítico en la muestra y sobre todo a la falta de referencia cronológica entre el desarrollo del cemento y la sedimentación de la morrena. De hecho los trabajos que usan este método por lo general presentan series de datos relativamente antiguas, y con amplias distribuciones cronológicas en coherencia con un envejecimiento esperado por presencia de ^{232}Th y un dilatado periodo de formación de cementos en la morrena desde su momento de sedimentación (Hughes et al., 2011). Las dataciones indirectas de sedimentos en ambientes kársticos están sujetos a que la interpretación que relaciona el máximo glaciar y el evento hídrico que generó el material datado sea correcta (Bakalowicz et al., 1984). Dado que los ambientes kársticos no tienen una respuesta lineal y que la mayor dinámica hídrica no corresponde con el máximo glaciar sino con momentos de deshielo, no lo consideramos un método fiable. Las dataciones por nucleidos cosmogénicos (habitualmente ^{36}Cl , ^{21}Ne y ^{10}Be) se pueden aplicar sobre superficies pulidas o generalmente en bloques glaciares. Aunque su aplicación sea directa sobre el elemento que represente el máximo glaciar, existen diversas circunstancias que pueden hacer que estas dataciones sean poco fiables. La existencia de herencia de eventos de exposición previa o la erosión deficiente desde el anterior evento de exposición puede envejecer las edades, mientras que un enterramiento parcial, la rotación del bloque o la erosión superficial de la muestras representan factores que pueden rejuvenecer las edades. Aunque existen una serie de protocolos de muestreo para evitar este tipo de circunstancias (p.e., Domínguez-Villar et al., 2013), es inevitable que algunas muestras puedan estar afectadas. Si se respeta estrictamente el protocolo de muestreo, el problema más habitual de estas técnicas es la rotación de bloques que pueda arrojar edades rejuvenecidas (Palacios et al., 2012). Como este es un proceso aleatorio, ha de realizarse un muestreo múltiple para descartar muestras fuera de rango o series completas si hay una falta de coherencia. Sin embargo, el problema más significativo de estas técnicas está relacionado con la erosión de materiales solubles (en los carbonatos) o con altas tasas de erosión (en rocas alteradas, bajo climas severos o en emplazamientos en los que pueda haber procesos erosivos episódicos). Por lo tanto, la

tasa de erosión ha de tenerse en cuenta antes de proceder al cálculo de edades para que la cronología sea fiable.

3. Replicabilidad de resultados. Una datación aislada no puede considerarse un resultado fiable por sí mismo. Han de realizarse una serie de dataciones sobre un mismo elemento o varios elementos que representen el máximo glaciar para cerciorar que el resultado no representa alguna anomalía. En ocasiones los datos presentan gran variabilidad (Palacios et al., 2012). En estos casos una fecha fiable sería aquella que presentara una alta replicabilidad de resultados, mientras que existan procesos capaces de explicar la dispersión de l resto de dataciones. De otra manera se está en presencia de una serie aleatoria de resultados a pesar de que puedan estar centrados en un rango determinado.

4. Coherencia con el contexto geomorfológico. Los resultados cronológicos tienen que ser congruentes con el contexto geomorfológico en el que se enmarcan. No parece razonable que la máxima extensión de los hielos esté próxima a los circos en macizos en los que los glaciares alcanzaron decenas de kilómetros (González-Sampériz et al., 2006), ni que la última glaciación tenga una extensión raquítica en comparación con anteriores periodos glaciares (Hughes et al., 2011).

5. Coherencia con el contexto paleoclimático. Una cronología de máximo glaciar ha de coincidir con periodos fríos, no excesivamente secos, y durante periodos de baja irradiación solar. De este modo, se hace evidente la inexactitud de fechas que coinciden con periodos interglaciares (Delmás et al., 2011). No obstante, se puede afinar mucho más ya que se ha sugerido la imposibilidad de alcanzar el máximo durante los periodos extremadamente secos como los eventos de Heinrich (Hughes y Woodward, 2008).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una serie de criterios para la evaluación de la fiabilidad de cronologías glaciares. Los criterios aquí expuestos se han aplicado a las cronologías más relevantes de las montañas mediterráneas (Domínguez-Villar et al., 2013). El resultado tras aplicar este control de calidad indica que la mayoría de cronologías consideradas han de ser desechadas por no cumplir alguno o varios de los criterios de robustez. Esto no implica necesariamente que las cronologías sean incorrectas (p.e., Giraudi, 2012), simplemente no son fiables por sí mismas. Por lo tanto, para poder realizar interpretaciones paleoclimáticas a nivel macroregional es preciso incluir solamente las cronologías glaciares robustas que permitan identificar patrones espacio temporales del desarrollo del máximo glaciar. Los criterios de fiabilidad aquí presentados deberían tenerse en cuenta durante las fases de planificación y de muestreo de futuros trabajos de cronología glaciar para poder ser consideradas fiables.

Agradecimientos: Esta investigación se ha financiado con fondos del Ministerio de Ciencia e Innovación (CGL2008-03396/BTE) y de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (PII1109-0138-6113).

Referencias bibliográficas

- Bakalowicz, M., Sorriaux, P. & Ford, D.C. (1984). Quaternary glacial events in the Pyrenees from U-series dating of speleothems in the Niaux-Lombrires-Savart caves, Ariège, France. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 38, 193-197.
- Bordonau, J., Vilaplana, J.M. & Fontugne, M. (1993). The glaciolacustrine complex of Llestuni (Central Southern Pyrenees): A key-locality for the chronology of the last glacial cycle in the Pyrenees. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 316(II), 807-813.
- Calvet, M., Delmas, M., Gunnell, Y., Braucher, R. & Bourlès, D. (2011). Recent advances in research on Quaternary glaciations in the Pyrenees. *Developments in Quaternary Science*, 15, 127-139.
- Carrasco, R.M., Pedraza, J., Domínguez-Villar, D., Villa, J. & Willenbring, J.K. (2012). The plateau glacier in the Sierra de Béjar (Iberian Central System) during its maximum extent. Reconstruction and chronology. *Geomorphology*, in press.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R. & Bourlès, D. (2011). Palaeogeography and ¹⁰Be exposure-chronology of middle and late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeog. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 305, 109-122.
- Domínguez-Villar et al. (2013). Early maximum extent of paleoglaciars from Mediterranean mountains during the last glaciación. *Scientific Reports*, under review.
- Florineth, D. & Schlüchter, C. (2000). Alpine evidence for atmospheric circulation patterns in Europe during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Research*, 54, 295-308.
- Giraudi, C. (2012). The Campo Felice late Pleistocene glaciación (Apennines, central Italy). *Journal of Quaternary Science*, 27, 432-440.
- González-Sampériz, P. et al. (2006). Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research*, 66, 38-52.
- Hughes, P.D. & Woodward, J.C. (2008). Timing of glaciación in the Mediterranean mountains during the last cold stage. *Journal of Quaternary Science*, 23, 575-588.
- Hughes, P.D., Woodward, J.C., Van Calsteren, P.C. & Thomas, L.E. (2011). The glacial history of the Dinaric Alps, Montenegro. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3393-3412.
- Ivy-Ochs, S. et al. (2008). Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. *Journal of Quaternary Science*, 23, 559-573.
- Lewis, C., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L. & Rhodes, E.J. (2009). Climatic implications of correlated upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change*, 67, 141-152.
- Mix, A.C., Bard, E. & Schneider, R. (2001). Environmental processes of the Ice Age: Land, Oceans, Glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, 20, 1-34.
- Monegato, G. et al. (2007). Evidence of a two-fold glacial advance during the last glacial maximum in the Tagliamento end moraine system (eastern Alps). *Quaternary Research*, 68, 284-302.
- Palacios, D., de Andrés, N., de Marcos, J. & Vázquez-Selem, L. (2012). Glacial landforms and their paleoclimatic significance in Sierra de Guadarrama, Central Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 139-140, 67-78.
- Pallàs, R. et al. (2006). Late Pleistocene and Holocene glaciación in the Pyrenees: a critical review and new evidence from ¹⁰Be exposure ages, south-central Pyrenees. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2937-2963.
- Rinterknecht, V.R. et al. (2006). The last deglaciación of the southeastern sector of the Scandinavian Ice Sheet. *Science*, 311, 1449-1452.