



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Evidencias de la teleconexión enfriamiento boreal/glaciares tropicales al Suroeste del Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Perú)

Jose Úbeda^{1,2,3}, Estibene Vásquez¹, Ronald Concha¹, Pablo Masías¹, Mariette Bustamante¹, Rosella Gómez³, Joshua Iparraguirre¹, Ítalo Barrientos¹, Gonzalo Luna¹, Igor Astete¹

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, Lima, Perú.

²Grupo de investigación en Geografía Física de Alta Montaña, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.

³Guías de Espeleología y Montaña, Casilla del Mortero, 28189 Torremocha del Jarama, Madrid, España.

⁴joseubeda@ucm.es

RESUMEN

Este trabajo presenta 27 edades de exposición de superficies a la radiación cósmica. Las edades datan 5 grupos de morrenas al suroeste del Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Perú), que abarcan todo el último ciclo glacial (desde hace ~130 ka). Las dataciones glaciales son contemporáneas a los episodios de enfriamiento del Hemisferio Norte, vinculados a las interrupciones de la circulación termohalina. Ese hecho sugiere que hay una teleconexión climática entre el enfriamiento boreal y la expansión de los glaciares en los Andes tropicales, en escalas de miles de años.

Palabras clave: edades glaciales, enfriamiento boreal, teleconexión climática, Nevado Hualcán

ABSTRACT

This work shows 27 surface exposure ages to the cosmic radiation. These ages are dating 5 moraine groups southwestward of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Peru), which span the entire last glacial cycle (since ~130 ka ago). The glacial datings are contemporary to the Northern Hemisphere cooling episodes, linked to the thermohaline circulation shutdown. This fact suggests that there is a climatic teleconnection between boreal cooling and the tropical Andes glacier expansion,

at millennial scales.

Keywords: glacial ages, boreal cooling, climate teleconnection, Nevado Hualcán

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Actualmente, la humedad del clima de los Andes de Perú está relacionada con el enfriamiento boreal, porque la mayor parte de la precipitación anual al sur del río Amazonas ocurre en el verano austral, cuando el invierno del Hemisferio Norte desplaza hacia el sur la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Es muy posible que el mismo vínculo boreal-tropical también sucediera en el pasado, en escalas de cientos a miles de años. Es una hipótesis sugerida por un amplio conjunto de evidencias geomorfológicas y sedimentarias (marinas y continentales), cronológicamente correlacionadas, que muestran la teleconexión entre fases climáticas de ambos hemisferios terrestres:

- Episodios más húmedos que el presente, en los Andes Centrales.

- Eventos de enfriamiento boreal: Heinrich (H1, H2... Hn) y Younger Dryas (YD), causados por interrupciones en la circulación termohalina, que bloquearon el intercambio de energía entre bajas y altas latitudes, debido a la desalinización causada por la descarga de icebergs en el Atlántico Norte.

La correlación cronológica enfriamiento boreal/humedad andina se ha detectado de varias maneras:

- En edades de morrenas, que muestran avances pasados síncronos con los eventos boreales fríos, tanto en paleoglaciares de la cordillera oriental de los Andes peruanos, más sensibles a la temperatura, p.e. en Quelccaya (Kelly et al., 2012), como en paleoglaciares de los Andes del sur de Perú y el oeste de Bolivia, más sensibles a la precipitación: en Coropuna (Úbeda et al., en revisión), Hualca Hualca (Alcalá-Reygosa et al., 2017), Cerro Tunupa (Blard et al., 2009) y volcán Uturuncu (Blard et al., 2014).

- En las transgresiones de las paleolagos en el altiplano boliviano, correlacionadas con fases de enfriamiento boreal. (Blard et al., 2011) vincularon las últimas transgresiones, Sajsi (~25-19 ka), Tauca (~18-14 ka) y Coipasa (~13-11 ka) con los eventos boreales YD y H1, y (Placzek et al., 2013) identificaron 10 transgresiones en los últimos ~130 ka, contemporáneas con temperaturas frías y descargas de icebergs en el Atlántico Norte. Por lo tanto, la misma teleconexión enfriamiento boreal/humedad andina puede haber ocurrido muchas veces a lo largo del último ciclo glacial, e incluso en anteriores ciclos glaciales del Pleistoceno. Las migraciones hacia el sur de la ZCIT se han detectado en escalas de cientos (Sachs et al., 2009) a decenas de miles de años (Schneider et al., 2014), en espeleotemas (Apaéstegui et al., 2018).

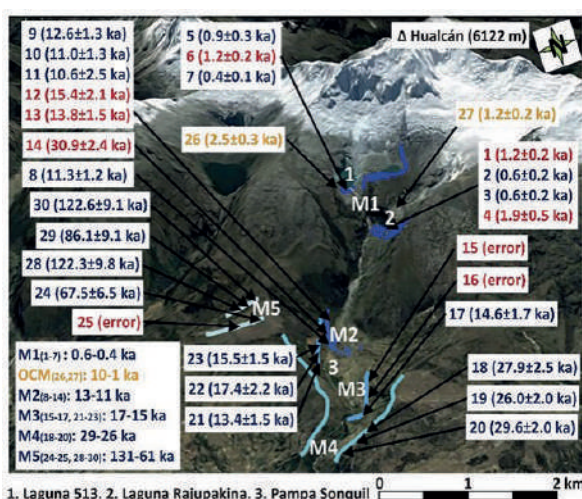


Figura 1: vista del suroeste del Nevado Hualcán, con indicación de las morrenas M1-M5 y los resultados indicados por las muestras: edades de bloques morrénicos (color azul) y lechos rocosos pulidos (amarillo) y edades atípicas o errores de medición en el ASTER (rojo).

Testigos de hielo glaciar (Thompson et al., 2000) y sedimentos marinos (Haug et al., 2001; Peterson et al., 2001). Las simulaciones numéricas también revelan la vinculación climática entre ambos hemisferios (Wanner et al., 2008), mostrando la ZCIT desplazada hacia el sur cuando el Atlántico Norte se enfría (Broccoli et al., 2006; Chiang and Bitz, 2005; Zhang and Delworth, 2005). Además, estudios más recientes sugieren que existe una teleconexión atmosférica global, entre el enfriamiento extratropical y la humedad tropical, proporcional al contraste térmico inter-hemisférico (Chiang and Friedman, 2012). El objetivo de este trabajo ha sido buscar evidencias de la teleconexión enfriamiento boreal/glaciares tropicales en el registro cosmogénico glacial, al suroeste del Nevado Hualcán (~9°S, ~78°W, 6122 m; Cordillera Blanca).

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Con una amoladora, un martillo y un cincel, se recolectaron muestras en las superficies de bloques situados en la cresta de 5 grupos de morrenas, al suroeste del Nevado Hualcán (figura 1):

- Morrenas M1, que cierran las lagunas 513 y Rajupakina.

- Morrenas M2, en la salida del barranco que desciende desde ambas lagunas hacia la Pampa Sonquill.

- Morrenas M3: depositadas por glaciares que alcanzaron la parte media de la Pampa Sonquill.

- Morrenas M4: generadas por la máxima expansión glaciar en la Pampa Sonquill.

- Morrenas M5: depositadas por avances más viejos, están cortadas por el valle glaciar de Pampa Sonquill.

También se muestrearon las superficies de dos lechos rocosos pulidos, vertiente arriba de las lagunas 513 y Rajupakina, para controlar la cronología de la deglaciación posterior a M2 y previa a M1.

Para conocer las edades de exposición a la radiación cósmica, se midió la acumulación de ^{10}Be en las superficies muestreadas. Ese isótopo cosmogénico fue seleccionado porque conlleva el procedimiento más sencillo y recomendable para rocas con cuarzo (Dunai, 2010), como las granodioritas de Hualcán. La preparación mecánica se realizó en el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

(INGEMMET), en Lima (Perú). Cada muestra fue triturada y tamizada y a continuación introducida en un separador Frantz LB-1, para apartar los minerales magnéticos de la roca a granel. La preparación química se realizó en el Laboratoire National des Nucléides Cosmogéniques (LN2C) del Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE), en Aix-en-Provence (Francia). Los minerales de cuarzo fueron separados disolviendo la fracción no magnética de las muestras en una mezcla de HCl (ácido clorhídrico concentrado) y H_2SiF_6 (ácido hexafluorosilícico), mediante 3 ataques sucesivos de 24 h de duración. Las impurezas restantes se disolvieron durante la descontaminación del ^{10}Be meteórico, que consiste en 3 ataques sucesivos de 48 h, con HF (ácido fluorhídrico). De esta manera se obtuvieron muestras de 10-30 g de cuarzo puro. Con una micropipeta, se añadió a cada muestra una solución de 100 μL de ^9Be , fabricada a partir de un cristal de fenaquita ($3025 \pm 9 \mu\text{g/g}$). Cada muestra enriquecida con ^9Be fue disuelta en HF. Más tarde, cada disolución fue evaporada y, seguidamente, primero se recuperó en una solución de HCl y después se precipitó con NH_3 (amoníaco). Después, cada muestra fue eluída a través de una columna de intercambio aniónico Dowex 1X8, para eliminar el Fe (hierro) y luego en una columna de intercambio catiónico Dowex 50WX8, para descartar el boro (B) y separar el Be de otros elementos (Merchel and Herpers, 1999). A continuación, el Be fue precipitado con NH_3 a $\text{Be}(\text{OH})_2$, y después oxidado a BeO en un horno a 700°C . El BeO objetivo se midió en el Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques (ASTER) del CEREGE (Arnold et al., 2010), para poder estimar la relación $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$. Dichas mediciones fueron calibradas con el estándar interno STD-11, utilizando un ratio asignado $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ de $1.191 (\pm 0.013) \times 10^{-11}$ (Braucher et al., 2015). Las incertidumbres analíticas 1 sigma incluyeron la indeterminación en las estadísticas de conteo AMS, en la relación estándar $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, y un error AMS externo de 0.5%. En la medición química se usó un blanco de ^{10}Be , con una vida media de $1.387 (\pm 0.01) \times 10^6$ años (Chmeleff et al., 2010; Korschinek et al., 2010). Las edades de ^{10}Be se estimaron en la calculadora online CRO-NUS, versión 2.0 (Balco et al., 2008), basada en modelo de escala L_m (Lal, 1991), dependiente del tiempo. Se emplearon la tasa de producción de Huancané-Quelccaya ($6.74 \pm 0.34 \text{ at/g/año}$; (Phillips et al., 2015), una densidad de roca 2.65 g/

cm^3 y presión atmosférica estándar para todas las muestras.

DISCUSIÓN

Los valores atípicos de las edades (figura 1) pueden atribuirse a la herencia de una producción cosmogénica anterior, como resultado de una exposición previa de la superficie. Sería el caso, p.e., de bloques caídos desde las paredes de la quebrada Hualcán, que no fueron suficientemente erosionados por un transporte glacial demasiado corto. Si se excluyen los valores atípicos, el resto de edades (y sus rangos de error) proporcionan intervalos coherentes con los grupos de morrenas previamente definidos. El grupo más antiguo (morrenas M5; edades 24-25, 28-30) indica que los avances anteriores a la excavación del valle glacial de Pampa Sonquil debieron suceder hace $\sim 132-61 \text{ ka}$. Ese rango tan amplio implica que los avances más viejos son anteriores al último ciclo glacial ($< 110 \text{ ka}$) y los avances más recientes, anteriores al último máximo glacial o Last Glacial Maximum (LGM), deducido del nivel relativo del mar (Clark et al., 2009; Lambeck and Chappell, 2001; Yokoyama et al., 2000). Por tanto, el valle glacial de Pampa Sonquil se habría encajado hasta el nivel de base actual en $< 60 \text{ ka}$. Esas fases glaciares más viejas podrían haber sido contemporáneas a las transgresiones de paleolagos más antiguas propuestas por (Placzek et al., 2013): Ouki ($> 130-100 \text{ ka}$) y Salinas ($> 100-80 \text{ ka}$), en ambos casos vinculadas con fases boreales frías. Las morrenas M4 (edades 18-20; $\sim 32-24 \text{ ka}$) son coherentes con un LGM temprano, que ha sido propuesto en diversos trabajos para los Andes Centrales (Shakun et al., 2015; Smith et al., 2005) y otras montañas del mundo (Clark et al., 2009; Hughes et al., 2013). Aunque (Placzek et al., 2013) no publicaron transgresiones para ese periodo, es posible que una migración hacia el sur de la ZCIT hubiese quedado restringida a la latitud del Hualcán ($\sim 9^\circ\text{S}$), sin alcanzar las latitudes tan meridionales de las cuencas bolivianas ($\sim 16-22^\circ\text{S}$). También es factible que esas evidencias no se hayan detectado todavía. Las morrenas M3 fueron depositadas en Pampa Sonquil por glaciares que alcanzaron casi la extensión del LGM, pero con menor espesor. Sus edades (15-17, 21-23; $\sim 20-12 \text{ ka}$) engloban el evento boreal frío H1 y la gran transgresión Tauca, que generó un paleolago de 52.000 km^2 y 120 m de profundidad en el centro de la cuenca de Uyuni (Blard et al., 2009; Blard et al., 2011). La deglaciación posterior a M3 pudo deberse a un debilitamiento de la circulación

tropical, como consecuencia del calentamiento boreal Bølling-Allerød, bien marcado en la temperatura del Atlántico Norte (figura 2). En ese tiempo los glaciares debieron retroceder vertiente arriba de la quebrada Hualcán, porque su avance o estabilización posterior solo alcanzó la desembocadura de dicha quebrada en la Pampa Sonquil (figura 1). En ese lugar está el grupo M2, cuyo amplio rango de edades (~14-8 ka), comprende el enfriamiento boreal durante el YD, la transgresión Coipasa y la mayor abundancia de los últimos 30 ka de plancton de agua dulce en el lago Titicaca (Fritz et al., 2007). Después de ~10 ka, todos los proxies paleoclimáticos (figura 2) y las edades de glaciares en otras montañas más meridionales y sensibles a la precipitación, Coropuna (Úbeda et al., en revisión) y Hualca Hualca (Alcalá-Reygosa et al., 2017), reflejan una deglaciación generalizada, coincidente con el calentamiento del Hemisferio Norte. En consonancia, las edades de lechos rocosos pulidos (26,27) muestran el retroceso de los glaciares, incluso más arriba de su posición actual, hace ~3-1 ka. Finalmente, aunque la morrena

M1 muestra un rango de edades mayor (hasta 2.4 ka), es probable que las edades 1, 6 y 4 hayan sido afectadas por herencia, debido a dos razones: 1) La posición de las morrenas indica que deben ser de la Pequeña Edad del Hielo (PEH). 2) Edades lichenométricas en montañas próximas de la Cordillera Blanca (Jomelli et al., 2008) sugieren que el avance inicial de la PEH ocurrió en el siglo XIV y fue sobrepasado por el máximo avance, en el siglo XVII, seguido por al menos tres avances menores en los siglos XVII y XVIII. Durante la PEH, también se ha detectado un desplazamiento hacia el sur de la ZCIT (Sachs et al., 2009), que tal vez influyó en la expansión glaciaria como resultado del enfriamiento del Hemisferio Norte.

CONCLUSIONES

Las edades glaciales del suroeste del Nevado Hualcán correlacionan bien con los episodios contemporáneos de enfriamiento boreal/humedad andina, sugiriendo que la misma teleconexión puede haber sucedido muchas veces, tanto en el último como en anteriores ciclos glaciales.

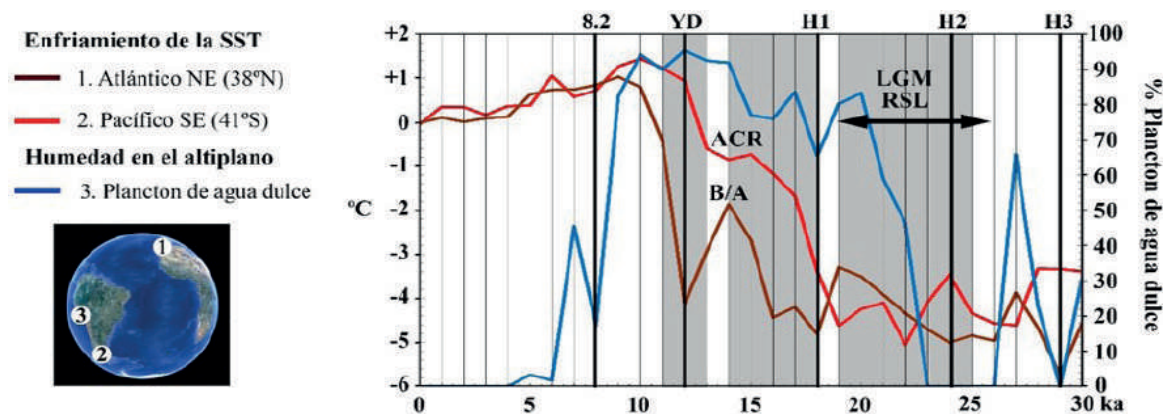


Figura 2: proxies paleoclimáticos. 1. Temperatura global (enfriamiento de la superficie del mar deducido de alkenonas): 1.1. Atlántico NE, al oeste de la Península Ibérica (38°N, 10°W; (Bard, 2003). 1.2. Pacífico SE, cerca de la costa del sur de Chile (41°S, 74°W; (Kaiser et al., 2005). 2. Humedad en los Andes Centrales: 2.1. Abundancia de plancton de agua dulce en los sedimentos del lago Titicaca (Fritz et al., 2007). 2.2. Áreas grises: cronología de los paleolagos en el altiplano boliviano (Blard et al., 2011). 3. Otros datos: 3.1. Líneas verticales negras: señales en la temperatura del Atlántico NE de los eventos fríos boreales, Heinrich 3-1 y Younger Dryas. 3.2. Flecha LGM-RSL: cronología del Last Glacial Maximum deducido del nivel relativo del mar (Clark et al., 2009; Lambeck and Chappell, 2001; Yokoyama et al., 2000). 3.3. ACR: señal Atlantic Cold Reversal en la temperatura del Pacífico SE.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por los proyectos CRYOPERU CIENCIACTIVA 144-2015 (<http://cryoperu.pe>); INGEMMET-GA51 y MOUNTAIN WARMING (CGL2015-65813-R), con la cooperación de la ONG Guías de Espeleología y

Montaña y Canal de Isabel II Gestión (Madrid, España).

REFERENCIAS

Alcalá-Reygosa, J., Palacios, D., Vázquez-Selem, J., 2017. A preliminary investigation of the timing of the local last glacial maximum and de-

glaciation on HualcaHualca volcano-Patapampa Altiplano (arid Central Andes, Peru). *Quaternary International* 449, 149-160.

Apaéstegui, J., Cruz, F.W., Vuille, M., Fohlmeistere, J., Espinoza, J.C., Sifeddineg, A., Strikish, N., Guyot, J.L., Ventura, R., Chengk, H., Edwards, R.L., 2018. Precipitation changes over the eastern Bolivian Andes inferred from speleothem ($\delta^{18}O$) records for the last 1400 years. *Earth and Planetary Science Letters* 494, 124–134.

Arnold, M., Merchel, S., Bourlés, D.L., Braucher, R., Benedetti, L., Finkel, R.C., Aumaître, G., Gott dang, A., Klein, M., 2010. The French accelerator mass spectrometry facility ASTER: improved performance and development.

Balco, G., Stone, J.O., Lifton, N.A., Dunai, T.J., 2008. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al measurements. *Quaternary Geochronology* 3, 174-195.

Bard, E., 2003. North-Atlantic Sea Surface Temperature Reconstruction, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology. Data Contribution Series #2003-026. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

Blard, P.-H., Lavé, J., Farley, K.A., Fornari, M., Jiménez, N., Ramirez, V., 2009. Late local glacial maximum in the Central Altiplano triggered by cold and locally-wet conditions during the paleolake Tauca episode (17–15 ka, Heinrich 1). *Quaternary Science Reviews* 28 (27-28), 3414-3427.

Blard, P.-H., Lavé, J., Farley, K.A., Ramírez, V., Jiménez, N., Martin, L.C.P., Charreau, J., Tibari, B., Fornari, M., 2014. Progressive glacial retreat in the Southern Altiplano (Uturuncu volcano, 22°S) between 65 and 14 ka constrained by cosmogenic 3He dating. *Quaternary Research* 82, 209–221.

Blard, P.-H., Sylvestre, F., Tripathi, A.K., Claude, C., Causse, C., Coudraing, A., Condom, T., Seidel, J.-L., Vimeux, F., Moreau, C., Dumoulin, J.-P., Lavé, J., 2011. Lake highstands on the Altiplano (Tropical Andes) contemporaneous with Heinrich 1 and the Younger Dryas: new insights from ^{14}C , U-Th dating and $d^{18}O$ of carbonates. *Quaternary Science Reviews* 30, 3973-3989.

Braucher, R., Guillou, V., Bourlés, D.L., Ar-

nold, M., Aumaître, G., Keddadouche, K., Notoli, E., 2015. Preparation of ASTER in-house $^{10}Be/^{9}Be$ standard solutions.

Broccoli, A.J., Dahl, K.A., Stouffer, R.J., 2006. Response of the ITCZ to Northern Hemisphere cooling. *Geophysical Research Letters* 33, 1-4.

Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J.F., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., Mc Cabe, A.M., 2009. The Last Glacial Maximum. *Science* 325, 710-714.

Chiang, J.C.H., Bitz, C.M., 2005. Influence of high latitude ice cover on the marine Intertropical Convergence Zone. *Climate Dynamics* 25, 477-496.

Chiang, J.C.H., Friedman, A.R., 2012. Extratropical cooling, interhemispheric thermal gradients, and tropical climate change. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 40, 383–412.

Chmeleff, J., Blanckenburg, F., Kossert, K., Jakob, D., 2010. Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting.

Dunai, T., 2010. *Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge University Press.

Fritz, S.C., Baker, P.A., Seltzer, G.O., Balantyne, A., Tapia, P., Cheng, H., Edwards, R.L., 2007. Lake Titicaca 370KYr LT01-2B Sediment Database. Lake Titicaca 370KYr LT01-2B Sediment Data. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series # 92-008. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program. Boulder (EEUU).

Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Röhl, U., 2001. Southward Migration of the ITCZ Through the Holocene. *Science* 293, 1304-1308.

Hughes, P.D., Gibbard, P.L., Ehlers, J., 2013. Timing of glaciation during the last glacial cycle: Evaluating the concept of a global 'Last Glacial Maximum' (LGM). *Earth-Science Reviews* 125, 171–198.

Jomelli, V., Grancher, D., Brunstein, D., Solomina, O., 2008. Recalibration of the yellow Rhizocarpon growth curve in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for LIA chronology. *Geomorphology* 93, 201-212.

- Kaiser, J., Lamy, F., Ninnemann, U., Hebbeln, D., Arz, H.W., Stoner, J., 2005. Southeast Pacific High Resolution Alkenone SST Reconstruction. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology. Data Contribution Series # 2005-073. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Kelly, M.A., Lowell, T.V., Applegate, P.J., Smith, C.A., Phillips, F.M., Hudson, M.A., 2012. Late glacial fluctuations of Quelccaya Ice Cap, southeastern Peru. *Geology* 40 (11), 991-994.
- Korschinek, G., Bergmaier, A., Faestermann, T., Gerstmann, U.C., Knie, K., Rugel, G., Wallner, A., Dillmann, I., Dollinger, G., Lierse von Gostomski, C., Kossert, K., Maiti, M., Poutivtsev, M., Remmert, A., 2010. A new value for the half-life of ^{10}Be by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting.
- Lal, D., 1991. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters* 104, 424-439.
- Lambeck, K., Chappell, J., 2001. Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science* 292, 679-686.
- Merchel, S., Herpers, U., 1999. An update on radiochemical separation techniques for the determination of long-lived radionuclides via accelerator mass spectrometry. *Radiochimica Acta* 84, 215-219.
- Peterson, L.C., Haug, G.H., Hughen, K.A., Röhl, U., 2001. Rapid Changes in the Hydrologic Cycle of the Tropical Atlantic During the Last Glacial. *Science* 290, 1947-1951.
- Phillips, M.F., Kelly, M., Hudson, A., Stone, O.H., Schaefer, J., Marrero, S., Fifield, L.K., Finkel, R., Thomas, L., 2015. CRONUS-Earth calibration samples from the Huancané II moraines, Quelccaya Ice Cap, Peru. *Quaternary Geochronology* 31, 220-236.
- Placzek, C.J., Quade, J., Patchett, P.J., 2013. A 130 ka reconstruction of rainfall on the Bolivian Altiplano. *Earth and Planetary Science Letters* 363, 97-108.
- Sachs, J.P., Sachse, D., Smittenberg, R.H., Zhang, Z., Battisti, D.S., Golubic, S., 2009. Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400-1850. *Nature Geoscience* 554, 1-7.
- Schneider, T., Bischoff, T., Haug, G.H., 2014. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature* 513, 45-53.
- Shakun, J.D., Clark, P.U., Marcott, S.A., Brook, E.J., Lifton, N.A., Caffee, M., Shakun, W.R., 2015. Cosmogenic dating of Late Pleistocene glaciation, southern tropical Andes, Peru. *Journal of Quaternary Science* 30, 841-847.
- Smith, J.A., Seltzer, G.O., Farber, D.L., Rodbell, D.T., Finkel, R.C., 2005. Early Local Last Glacial Maximum in the Tropical Andes. *Science* 308 (5722), 678-681.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., A., H.K., 2000. Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science* 15 (4), 377-394.
- Úbeda, J., Bonshoms, M., Iparraguirre, J., Sáez, L., de la Fuente, R., Janssen, L., Concha, R., Vásquez, P., Masías, P., en revisión. Prospecting glacial ages and paleoclimatic reconstructions northeastward of Nevado Coropuna (16°S, 73°W, 6377 m), arid Tropical Andes. *Geosciences*.
- Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M., Widmann, M., 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews* 27 (19), 1791-1828.
- Yokoyama, Y., Lambeck, K., De Deckker, P., Johnston, P., Fifield, K.L., 2000. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature* 406, 713-716.
- Zhang, R., Delworth, T.L., 2005. Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation. *Journal of Climate* 18 (12), 1853-1860.