

LA EVOLUCIÓN GLACIOVOLCÁNICA DEL NEVADO COROPUNA DESDE LA TRANSICIÓN DEL PLEISTOCENO AL HOLOCENO

Jose Úbeda¹, David Palacios¹ y Lorenzo Vázquez-Selem²

¹Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña. Universidad Complutense de Madrid (España).

²Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (México).

joseubeda@ghis.ucm.es

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:

El Nevado Coropuna (15°31'S, 72°39'O, 6377 msnm) está en un sector del borde meridional del Altiplano afectado por grandes deslizamientos, 150 km al NO de la ciudad de Arequipa. Es un complejo de estratovolcanes adyacentes que divide las cuencas hidrográficas de los ríos Ocoña y Majes, los principales colectores fluviales de la vertiente del Pacífico de los Andes Centrales entre 14 y 16°S (figura 1).

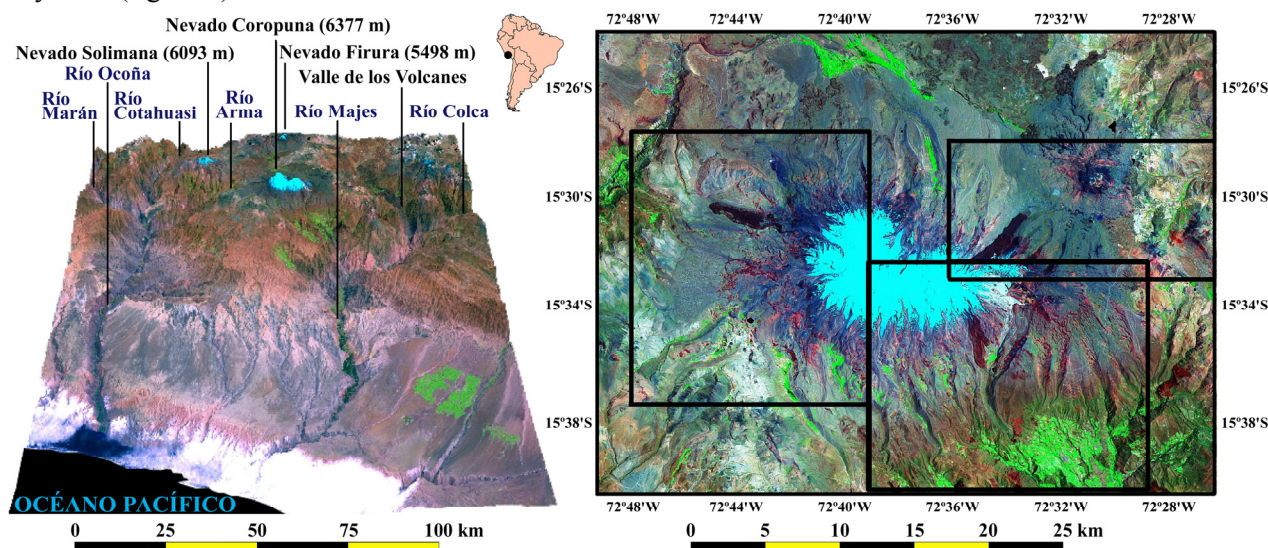


Figura 1: modelo tridimensional e imagen de satélite de la región del Nevado Coropuna, señalando la delimitación de las áreas comprendidas por las cartografías geomorfológicas (figura 2).

El interés de la investigación del Nevado Coropuna obedece a tres razones principales:

1) La pérdida de masa que se ha observado en los glaciares (Úbeda, 2011), que constituyen la principal reserva hídrica de la que depende el abastecimiento de varias decenas de miles de personas y sus actividades económicas. Investigar su evolución en el pasado permitirá predecir tendencias de futuro y proporcionará a las autoridades locales la información que necesitan para priorizar las políticas para mitigar los efectos del cambio climático en las reservas de agua.

2) El escenario de riesgo que se deduce de la concatenación de cinco factores: las dimensiones del sistema glaciar (47 km² en 2007) y su presencia sobre un complejo volcánico activo (Úbeda, 2011), el fuerte desnivel de las vertientes (6000 m hasta el Océano Pacífico en 150 km de distancia) y la localización vulnerable de la población en el fondo de los valles fluviales.

3) La evolución de las condiciones ambientales ha quedado registrada en sus vertientes en forma de morrenas y lechos rocosos pulidos generados por las acciones erosivas y sedimentarias de las masas de hielo. Ese registro y la sensibilidad de los glaciares a las condiciones ambientales, fundamentalmente temperatura y precipitación (Kaser and Osmaston, 2002), convierten al Nevado Coropuna en un excelente laboratorio para evaluar los cambios climáticos en los Andes Tropicales áridos, entre 15 y 16°S.

El objetivo de este trabajo ha sido contribuir al conocimiento de las cronologías de la evolución de los glaciares y las erupciones más recientes del Nevado Coropuna, contrastando los resultados con proxies de alta resolución y otras evidencias paleoclimáticas, a escala regional y global.

2. METODOLOGÍA:

La estrategia de la investigación ha consistido en utilizar un mapa geomorfológico previamente publicado (Úbeda, 2011) para seleccionar tres tipos de unidades geomorfológicas y muestrear sus superficies: 1) Bloques emplazados en la cresta de las morrenas laterales depositadas por las últimas fases de máxima expansión de las masas de hielo. 2) Lechos rocosos pulidos, que reflejan el proceso de deglaciación. 3) Coladas de lava atribuidas por el mapa geomorfológico a época Holocena.

Las muestras fueron analizadas para evaluar la acumulación del isótopo cosmogénico ^{36}Cl en la superficie de las rocas. La estimación de las edades de exposición a la radiación cósmica (*Surface Exposure Dating-SED*) se realizaron utilizando dos instrumentos diferentes: 1) El programa CHLOE (Phillips and Plummer, 1996). 2) La aplicación *online* CRONUS CALCULATOR, versión para ^{36}Cl (<http://www.cronuscalculators.nmt.edu/cl-36/>). El promedio de los resultados de ambas herramientas fue seleccionado como mejor estimación de las SED.

Para definir un contexto paleoclimático de referencia se construyó un diagrama que representa la evolución de los promedios cada milenio de dos proxies de temperatura y humedad de los Andes Centrales durante los últimos 40 ka: 1) La temperatura de la superficie del mar (SST) en las Islas Galápagos (Lea et al., 2006). 2) La abundancia de plancton de agua dulce en los sedimentos del Titicaca (Fritz et al., 2007).

La población de plancton de agua dulce proporciona información sobre la humedad del clima porque el nivel del lago es inversamente proporcional a su salinidad. Las bases de datos originales están disponibles en el enlace del NOAA Paleoclimatology Program (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/>).

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES PRINCIPALES:

Las SED glaciares y volcánicas y la localización de las muestras se han recogido en una tabla y se han representado en tres mapas geomorfológicos, diferenciando los sectores NE, SE y W del Nevado Coropuna (figura 2 y tabla 1). El análisis de los resultados permitió clasificarlos en ocho grupos y establecer las siguientes conclusiones:

1) La SED NCSE12 (~83 ka) confirma que el enorme dinamismo de la evolución glaciovolcánica del Nevado Coropuna durante el Pleistoceno, sugerida por la presencia de varias generaciones de morrenas en vertientes que fueron desconectadas topográficamente del área de cumbres por acciones erosivas de las masas de hielo hace decenas de miles de años.

2) Las estimaciones anteriores realizadas por (Bromley et al., 2009) en el valle Mapa Mayo demuestran que el último máximo avance de los paleoglaciares ya había comenzado en ~21 ka. En ese tiempo las masas de hielo descendieron por las vertientes y culminaron diferencialmente su avance dependiendo de la altitud del área fuente y la topografía del lecho.

3) Las muestras NCNE02, NCNE04, NCNE05 reflejan el acceso y la detención de los paleoglaciares del sector NE en el altiplano, entre ~21 ka y ~16 ka. La barrera topográfica impuesta a su descenso por la presencia de la meseta generó un extenso campo de hielo.

4) Cuando los paleoglaciares cubrieron completamente el altiplano se canalizaron por los valles que se abren más allá de sus límites NE y SE, el avance culminó en ~14 ka (NCSE10) en el valle Yanaorco (SE), y a continuación en el valle Jellojello (NE), entre ~13 y ~12 ka (muestras NCNE08 y NCNE09).

5) Posteriormente ocurrió un segundo reavance que en la mayoría de los valles superó a la progresión inicial, pero en el que sólo participaron paleoglaciares procedentes del área de cumbres. La culminación de esa fase de máxima expansión ocurrió entre ~11 ka y ~10 ka (NCSE11-13, NCSE15-17) y erosionó parcialmente las morrenas depositadas en fases anteriores.

6) La mayor parte de las SED glaciales (NCSE18-21, NCSW24-26) reflejan la retirada de las masas de hielo por las vertientes, en el marco de la tendencia de deglaciación que ha caracterizado al Holoceno. Las fechas deducidas de las muestras NCSE22 y NCSW27 marcan la retirada temprana (~9 ka) de paleoglaciares afluentes del colector principal, procedentes de altitudes más reducidas.

7) Otras dataciones (NCNE06 y NCSE14) muestran reavances de menor entidad, que no alcanzaron las mismas dimensiones que en las fases previas.

8) Las cronologías NCNE28, NCSE29 y NCNE03 reflejan que el proceso de deglaciación está acompañado por una reactivación de la actividad eruptiva, con una migración aparente desde el NW hacia el Este del complejo volcánico.

DENOMINACIÓN DE LOS VALLES GLACIARES:

0. Mapa Mayo. 1. Santiago. 2. Queñua Ranra. 3. Cuancaicha-Pomullca. 4. Pomullca-Huajra Huire. 5. Cerro Pumarranra. 6-8. Pampa Pucaylla. 7. Jellojello. 9. Yanaorco. 10. Viques. 11 Cospanja. 12. Buena Vista Este. 13. Buena Vista Oeste. 14. Huasi. 15. Río Blanco. 16 Cerro Sepulturayoc.

MUESTRAS: ● Bloques morrénicos ● Lechos rocosos pulidos
● Coladas de lava

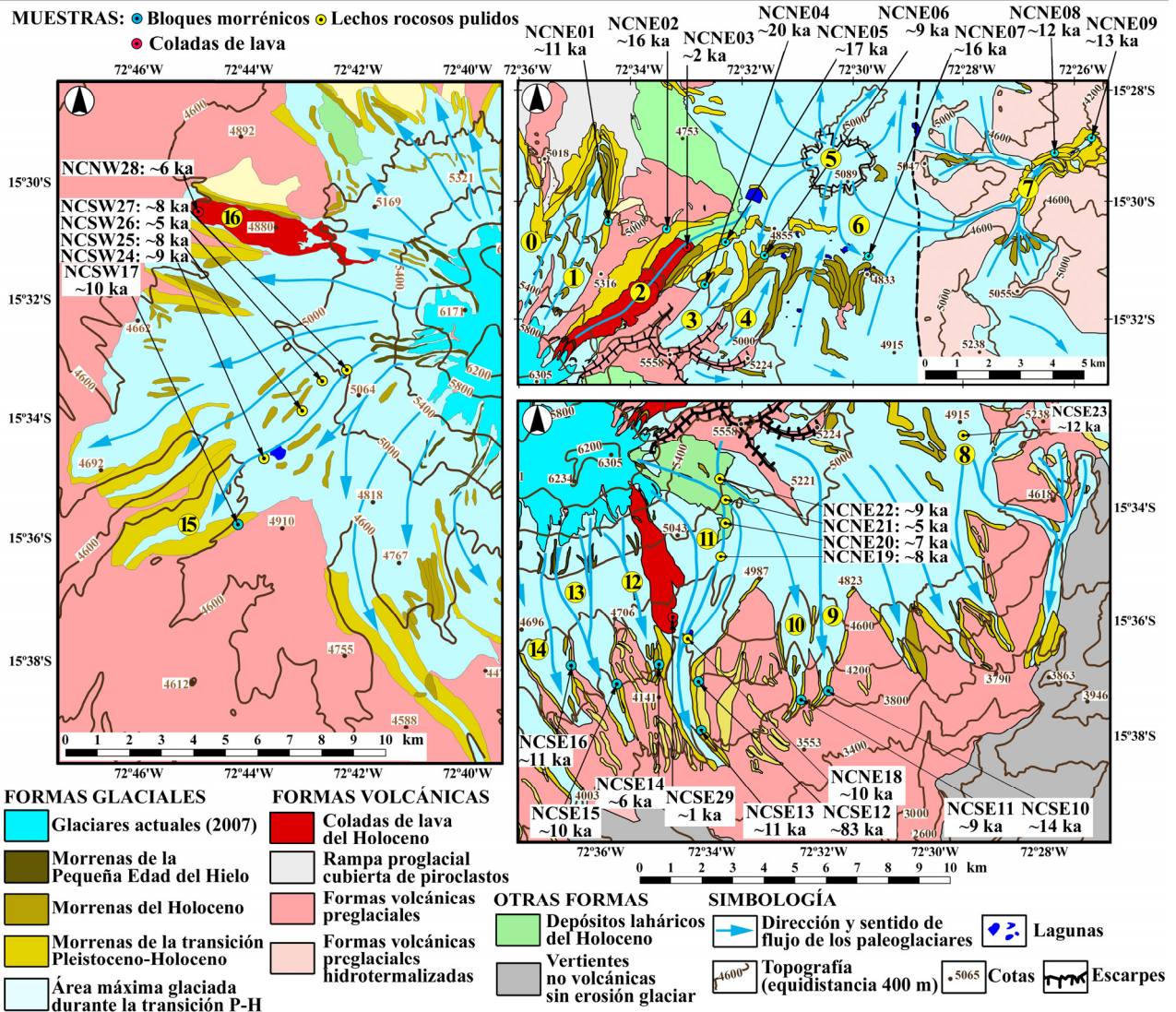


Figura 2: mapas geomorfológicos de los sectores NE, SE y O del complejo volcánico Nevado Coropuna, con indicación de las SED glaciales y volcánicas y la localización de las muestras.

Muestra	NCNE01	NCNE02	NCNE04	NCNE05	
Und. geomorfológica	Morrena lateral	Morrena lateral	Morrena lateral	Morrena lateral	
Valle o lugar	Santiago	Queñua Ranra	Cuncaicha-P.	Cuncaicha-P.	
msnm	5060	5013	4915	5052	
SED (ka)	11.3±0.5	16.2±0.7	19.7±2.1	17.1±0.6	
Muestra	NCNE06	NCNE07	NCNE08	NCNE09	
Und. geomorfológica	Morrena lateral	Arco morrénico	Morrena lateral	Arco morrénico	
Valle o lugar	Pomullca-Huajra Huire	Pampa Pucaylla	Jellojello	Jellojello	
msnm	4929	4914	4080	4384	
SED (ka)	8.7±0.6	15.8±0.5	12.2±0.8	12.7±0.4	
Muestra	NCSE10	NCSE11	NCSE12	NCSE13	NCSE14
Und. geomorfológica	Morrena lateral	Morrena lateral	Morrena lateral	Morrena lateral	Morrena lateral
Valle o lugar	Yanaorco	Viques	Cospanja	Cospanja	Buena Vista E
msnm	3985	3935	4237	3933	4308
SED (ka)	14.0±0.9	9.4±0.7	83.2±3.0	11.4±0.7	6.0±0.5
Muestra	NCSE15	NCSE16	NCSE18	NCSE19	
Und. geomorfológica	Morrena lateral	Morrena lateral	Lecho pulido	Lecho pulido	
Valle o lugar	Buena Vista W	Huasi	Cospanja	Cospanja	
msnm	4295	4553	4266	4724	
SED (ka)	10.3±1.0	11.5±1.1	10.3±0.6	7.7±0.6	
Muestra	NCSE20	NCSE21	NCSE22	NCSE23	NCSE29
Und. geomorfológica	Lecho pulido	Lecho pulido	Lecho pulido	Lecho pulido	Colada de lava
Valle o lugar	Cospanja	Cospanja	Cospanja	Pampa Pucaylla	Cospanja
msnm	4295	4553	4686	4266	4724
SED	6.5±0.7	5.4±0.8	9.1±0.7	12.0±0.6	1.1±0.1
Muestra	NCSW17	NCSW24	NCSW25	NCSW26	NCSW27
Und. geomorfológica	Morrena lateral	Lecho pulido	Lecho pulido	Lecho pulido	Lecho pulido
Valle o lugar	Pallarcocha	Pallarcocha	Pallarcocha	Pallarcocha	Pallarcocha
msnm	4686	4524	4891	4971	5059
SED (ka)	9.5±0.6	8.8±0.7	7.8±1.1	5.4±0.3	8.2±0.5

Tabla 1: SED glaciales del Nevado Coropuna.

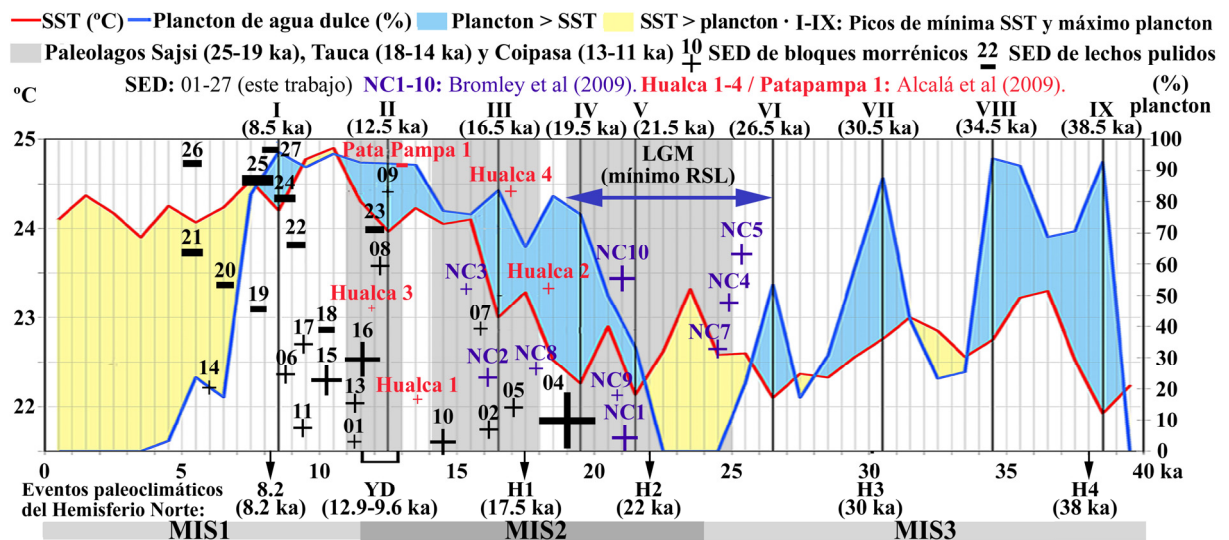


Figura 3: representación de las SED glaciales en un diagrama paleoclimático desde 40 ka.

Las evidencias disponibles (figura 3) sugieren que durante la transición Pleistoceno-Holoceno las condiciones excepcionalmente húmedas indicadas por el plancton de agua dulce del Titicaca compensaron la tendencia al calentamiento global que muestra la SST de las Galápagos, permitiendo que en el Nevado Coropuna ocurriesen máximos avances glaciares hasta ~9 ka.

La hipótesis es coherente con la presencia de paleolagos en el altiplano boliviano (Blard et al., 2009; Placzek et al., 2006) durante los ciclos Sajsi (25-19 ka), Tauca (18-14 ka) y Coipasa (13-11 ka), cuya explicación también requiere que el clima fuese notablemente más húmedo que el actual. Las cronologías estimadas en este trabajo se suman a las que obtuvieron Bromley et al. (2009) en el Nevado Coropuna y Alcalá et al., (2009) en el complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, (120-140 km hacia el Este y en un contexto geomorfológico muy parecido). Una parte de las SED (figura 3) sugiere que la última fase regional de máxima expansión glacial comenzó en ~25 ka, y a continuación culminó diferencialmente en cada valle en función de la altitud del área fuente: muestras NCNE02, 04-09 (este trabajo); Hualca 1, 2 y 4 (Alcalá et al., 2009) y NC1-10 (Bromley et al., 2009). La muestra NCSE10 indica que en ~14 ka había campos de hielo recubriendo sectores del altiplano aislados de cumbres más elevadas, que emitieron los flujos que depositaron las morrenas del valle Yanaorco, en el sector SE del Nevado Coropuna. Las demás muestras de bloques morrénicos (NCNE01 y NCNE06; NCSE11-16 y NCSW17) indican que entre ~13 y ~9 ka sucedieron nuevos máximos avances, pero solo en valles procedentes de las cumbres más elevadas. Los reavances volvieron a alcanzar las mismas posiciones que en fases previas y depositaron sus morrenas encima de las anteriores. Así se explica que en el mismo conjunto de morrenas se hayan encontrado SED más recientes (NCNE01, este trabajo) y otras más antiguas (NC1-2; Bromley et al., 2009), dependiendo de si las muestras fueron recogidas en las morrenas interiores o exteriores del grupo. Las muestras NCSE18-22 y NCSW24-26 reflejan la retirada de las masas de hielo desde altitudes sucesivamente más elevadas. La tendencia a la deglaciación fue interrumpida por pequeños reavances, p.e. en ~6 ka (NCSE14), que no alcanzaron la magnitud de los episodios anteriores. Las muestras de coladas de lava (NCNE03; NCSW27 y NCSE28) demuestran que el Nevado Coropuna es un volcán activo y ha tenido tres erupciones recientes (~6; ~2 y ~1 ka). Ese hecho recomienda la realización de un monitoreo vulcanológico permanente que permita evaluar con suficiente precisión el riesgo hidrovulcánico.

4. AGRADECIMIENTOS:

Investigación co-financiada por el Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña (UCM) y el proyecto CGL2009-7334 del Ministerio de Ciencia e Innovación (España), con la cooperación del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (UGRH-ANA), el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Canal de Isabel II y Guías de Espeleología y Montaña (GEM).

5. REFERENCIAS:

- Alcalá, J., Palacios, D., Zamorano, J.J. and Vázquez, L., 2009. Glacial Evolution of the Ampato volcanic complex (Peru), *Geophysical Research Abstracts*. *Geophysical Research Abstracts*, pp. 7820-1.
- Blard, P.-H. et al., 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.
- Bromley, G.R. et al., 2009. Relative timing of last glacial maximum and late-glacial events in the central tropical Andes. *Quaternary Science Reviews*, 1-13.
- Fritz, S.C. et al., 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).
- Kaser, G. and Osmaston, H., 2002. *Tropical Glaciers*. International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge (U.K.), 207 pp.
- Lea, D.W. et al., 2006. Galápagos TR163-22 Foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca Data and SST Reconstruction. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series # 2006-090. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder (EEUU).
- Phillips, F.M. and Plummer, M.A., 1996. CHLOE: A program for interpreting in-situ cosmogenic nuclide dating and erosion studies (abs). *Radiocarbon*, 38: 98.
- Placzek, C., Patchett, P.J., Quade, J. and Wagner, J.D.M., 2006. Strategies for successful U-Th dating of paleolake carbonates: An example from the Bolivian Altiplano. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7: Q05024.
- Úbeda, J., 2011. El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú), Universidad Complutense de Madrid, 558 pp.