

# METODOLOGÍA PARA ANALIZAR LA EVOLUCIÓN DE LOS GLACIARES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADO COROPUNA (15°31'S 72°39'O 6.377 m.) EMPLEANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y DATACIONES ABSOLUTAS OBTENIDAS POR MÉTODOS COSMOGÉNICOS (<sup>36</sup>CI)

Jose Úbeda Palenque\*, David Palacios Estremera\* y Lorenzo Vazquez Selem\*\*

\*Departamento de A.G.R. y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid (España)

\*\*Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México (México)

joseubeda@ghis.ucm.es

## INTRODUCCIÓN

El Nevado Coropuna (15°31'S-72°39'O) es un complejo volcánico constituido por varios edificios que forma parte de la divisoria de aguas de las cuencas hidrográficas de los ríos Ocoña y Majes, principales colectores fluviales de la fachada occidental de la Cordillera de los Andes Centrales entre 73°30' y 71°30' Oeste. El complejo se levanta en el contacto del altiplano con la empinada rampa a través de la cual la cordillera occidental de los Andes Centrales enlaza con la costa del Océano Pacífico. El área de cumbres del Nevado Coropuna se encuentra cubierta por un sistema glaciar formado por varias decenas de aparatos que descienden ladera abajo en todas direcciones. En sus vertientes han sido cartografiadas varios cientos de formas morrénicas en las que ha quedado registrado la evolución de las masas de hielo y los cambios climáticos desde hace varias decenas de miles de años (Úbeda, 2007). El estudio del complejo volcánico y el sistema glaciar es de gran interés porque las masas de hielo constituyen una reserva hídrica esencial para el sostenimiento y desarrollo sostenible de una población de varias decenas de miles de habitantes, que se concentra en el fondo de los profundos valles del Ocoña y el Majes como consecuencia de la extrema aridez del clima. Además, el volcán, el sistema glaciar y la localización vulnerable del poblamiento en torno a sus principales vías de evacuación, junto con el fuerte desnivel en la vertiente del Pacífico, configuran un preocupante escenario de riesgo, debido a la amenaza de que se originen avenidas hipersaturadas de lodo como consecuencia de la fusión repentina de parte de las masas de hielo por causas volcánicas, tectónicas o climáticas. Finalmente, el sistema glaciar y las evidencias de su evolución en el pasado constituyen un excelente geoindicador del cambio climático reciente (desde hace sólo algunas décadas) y también más a largo plazo (desde hace varias decenas de miles de años hasta hace poco más de uno o dos siglos). En este trabajo se exponen los resultados obtenidos por este equipo de investigación utilizando un método que ha permitido modelizar la evolución de los glaciares del Nevado Coropuna en un Sistema de Información Geográfica (SIG), estimando superficies, volúmenes y altitudes de las líneas de equilibrio (ELAs) de las masas de hielo en diferentes fases. De ese modo se ha generado una base de datos que ha permitido estimar tasas de deglaciación basadas en las tendencias de superficies y ELAs y deducir pronósticos en hipotéticos escenarios de futuro. Para analizar la evolución reciente de los glaciares se han empleado ortofotos e imágenes de satélite. Para analizar su evolución en el pasado una cartografía geomorfológica desarrollada en un entorno operativo de Sistemas de Información Geográfica (Úbeda, 2007) y dataciones absolutas obtenidas por métodos cosmogénicos.

## OBJETIVOS

Los objetivos de la investigación han sido los siguientes: **2.1.** Analizar la evolución global del sistema glaciar desde mediados del siglo XX, cuantificando superficies, volúmenes y ELAs en las fases que se definan. **2.2.** Seleccionar un grupo piloto de glaciares para analizar su evolución en las mismas fases, su último avance, en la Pequeña Edad del Hielo (PEH), y su último máximo avance, en el último máximo glacial (LGM). **2.3.** Determinar la cronología absoluta y la depresión de la altitud de la línea de equilibrio (ELA) durante el último máximo avance. **2.4.** Establecer tasas de deglaciación de las masas de hielo y modelizar su evolución probable en diferentes escenarios de futuro. **2.5.** Realizar una evaluación preliminar de la amenaza hidrovulcánica estableciendo la cronología absoluta de las

emisiones de lava con aspecto más reciente, que fueron cartografiadas y georeferenciadas en trabajos anteriores (Úbeda, 2007).

## **METODOLOGÍA**

En un Sistema de Información Geográfica (SIG) se integraron una topografía digital con 50 m de equidistancia entre curvas de nivel, dos ortofotos del sector central del complejo Coropuna (15-6-1955 y 21-10-1986), una imagen del satélite ASTER (12-11-2007) y una cartografía geomorfológica del complejo volcánico, elaborada en una etapa anterior de la investigación (Úbeda, 2007). En ese entorno de trabajo se realizaron las siguientes operaciones:

**Delimitación del glaciar y medida de su superficie:** utilizando como base las ortofotos y la imagen de satélite se delimitaron los glaciares en 1955, 1986 y 2007. Empleando como base la cartografía geomorfológica se delimitó la extensión alcanzada por los glaciares del grupo piloto durante su último avance y su último máximo avance. A continuación se calcularon las superficies de todas las fases utilizando aplicaciones automáticas del entorno operativo SIG.

**Evaluación teórica del volumen del glaciar:** estudios empíricos (Meier & Bahr, 1996) y teóricos (Bahr et al., 1996) indican que el volumen de los glaciares es una función exponencial de su área (Klein & Isacks, 1998), según expresa la ecuación:  $V = c \cdot A^b$ , donde  $V$  es volumen de hielo ( $\text{Km}^3$ ),  $A$  área del glaciar,  $c$  factor de escala lineal ( $c=0,048$ ) y  $b$  factor de escala exponencial ( $b=1,36$ ). Utilizando esta ecuación se obtuvo una evaluación teórica del volumen de los glaciares en cada fase.

**Estimación de la altitud de la línea de equilibrio del glaciar (ELA):** para estimar la ELA de los glaciares se empleó el método Área x Altitude Balance Ratio (AABR) ampliamente descrito por Osmaston (2005). En ese trabajo se facilitan instrucciones para programar las operaciones en hojas de cálculo automatizando su aplicación, que se realiza en dos fases. Para aplicar el método fue necesario delimitar previamente las bandas altitudinales de los glaciares y calcular las superficies de cada intervalo altitudinal. En una primera fase se estimaron en las hojas de cálculo las ELAs por el método Área x Altitude (AA), empleando la ecuación:  $ELA = \Sigma Z \cdot A / \Sigma A$ , siendo  $\Sigma Z \cdot A$  sumatorio del producto de la altitud media de cada intervalo altitudinal por su área y  $\Sigma A$  sumatorio de las áreas de las bandas altitudinales. A continuación, introduciendo diferentes valores de Balance Ratio (BR), la hoja de cálculo estimó el balance de masa para todo el glaciar, devolviendo el valor de la altitud donde el balance de masa es cero (ELA). De ese modo se generó una base de datos constituida por series de valores de ELAs con sus correspondientes valores de BR. En este trabajo se utilizaron los valores de BR 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0. En una segunda fase se tabularon los valores de las ELAs en series de datos vinculadas con un mismo valor de BR y se calcularon los promedios y desviaciones típicas de cada serie, seleccionando como valor de ELA AABR el promedio con una desviación típica más reducida, por considerar que es el más probable (Osmaston, 2005). La ELA obtenida por el método AABR es por lo tanto un concepto estadístico vinculado a un grupo homogéneo de glaciares. A causa de su naturaleza estadística el método AABR sólo puede ser aplicado a series de glaciares, debido a lo cual la ELA global del sistema glaciar fue estimada por el método AA. Con el fin de poder comparar los resultados de las diferentes fases, los glaciares del grupo piloto fueron agrupados previamente en conjuntos homogéneos, empleando como criterio su vinculación con un mismo valle glaciar durante la fase de último máximo avance (LGM).

**Definición de tasas de deglaciación y deducción de pronósticos de futuro:** para establecer las tasas de deglaciación se emplearon como geoindicadores las variaciones observadas en 2007 en superficies y ELAs con respecto a sus valores en 1986, 1955 y en la Pequeña Edad del Hielo (PEH), en este caso exclusivamente para los glaciares del grupo piloto. Las tasas de deglaciación ( $T_d$ ) fueron calculadas empleando las ecuaciones:  $T_{d_s} = \Delta S / \text{Rango}$ , cuando el geoindicador utilizado fue la variación de la superficie y  $T_{d_{ELA}} = \Delta ELA / \text{Rango}$ , cuando el geoindicador fue la variación de la ELA. El Rango es el número de años de la serie. El establecimiento de las tasas de deglaciación  $T_{d_s}$  y  $T_{d_{ELA}}$  permitió elaborar pronósticos sobre cuando se produciría la desaparición completa de las masas de hielo (Horizonte 0) en tres escenarios de futuro, considerando la hipotética reproducción en cada escenario

de las tasas de deglaciación observadas desde 1986 (Escenario 1), 1955 (Escenario 2) y PEH (Escenario 3). El Horizonte 0 ( $H_0$ ) fue calculado utilizando las ecuaciones  $H_0=(S_{2007}/Td_S)+2007$ , cuando el geoindicador fue la variación de la superficie y  $H_0=(D_{2007}/Td_{ELA})+2007$ , cuando el geoindicador fue la variación de la ELA, siendo  $H_0$  año en que se produciría la desaparición del glaciar,  $S_{2007}$  superficie del glaciar en 2007 ( $Km^2$ ),  $Td_S$  tasa anual de deglaciación ( $Km^2/año$ ),  $D_{2007}$  desnivel entre el valor de la ELA en 2007 y la cota máxima del grupo homogéneo de glaciares (m) y  $Td_{ELA}$  la tasa anual de deglaciación o incremento anual de la ELA (m/año).

**Determinación de las cronologías del último máximo avance glaciar y las últimas emisiones volcánicas:** se muestrearon formas morrénicas atribuibles al último máximo avance de las masas de hielo y lavas emitidas durante la última erupción del sector oriental del complejo volcánico (figura 7). Por su aspecto reciente, por encauzarse en el interior de valles glaciares y encontrarse afectadas por la acción de las masas de hielo exclusivamente durante su último avance (PEH), a esas lavas les había sido atribuida una edad holocena (Úbeda, 2007). Las dataciones absolutas fueron realizadas empleando técnicas cosmogénicas ( $Cl_{36}$ ).

## RESULTADOS

**Evolución reciente del sistema glaciar del Nevado Coropuna:** se han estimado superficies, volúmenes y ELAs globales del sistema glaciar en 2007, 1986 y 1955 (figura 1).

**Evolución del grupo piloto de glaciares (grupo NE):** se ha delimitado la extensión de los glaciares del grupo NE en 2007, 1986, 1955, durante su último avance y durante su último máximo avance (figuras 2 y 3). Se han estimado superficies, volúmenes y ELAs, por el método AA para todo el sistema glaciar (figura 1) y por el método AABR para los glaciares del grupo piloto (figuras 4 y 5). Las estimaciones de la depresión de la ELA en el LGM se encuentran en concordancia con otras de la cordillera oriental de los Andes Centrales (Smith et al., 2005a; Smith et al., 2005b).

**Cronología del último máximo avance de los glaciares del grupo piloto (grupo NE):** los análisis de la muestra de un bloque situado sobre el cordón morrénico lateral de la quebrada de Queñua Ranra (figura 3) sugieren una cronología de 17  $Cl_{36}$  Ka BP para el último máximo avance de los glaciares vinculados a esta quebrada. La contextualización de la datación cosmogénica en un marco paleoclimático de referencia (figura 6) demuestra su concordancia con los indicadores de temperatura y humedad de ese modelo.

**Tasas de deglaciación y pronósticos basados en escenarios de futuro:** en función de las variaciones experimentadas por superficies y ELAs se han calculado las tasas de deglaciación y el Horizonte sin glaciares ( $H_0$ ), de forma global para todo el sistema glaciar, en los escenarios 1 y 2 (figura 1) y para los glaciares del grupo piloto, en los escenarios 1, 2 y 3 (figuras 4 y 5).

**Cronología de la última fase de actividad volcánica:** la lava emitida por el edificio más oriental del complejo volcánico Nevado Coropuna, que se encauza hacia el NE por el interior del valle glaciar de Queñua Ranra (figura 7), ha sido datada en 2  $Cl_{36}$  Ka BP.

FIGURA 1

EVOLUCIÓN GLOBAL DEL SISTEMA GLACIAR NEVADO COROPUNA 1955-1986-2007

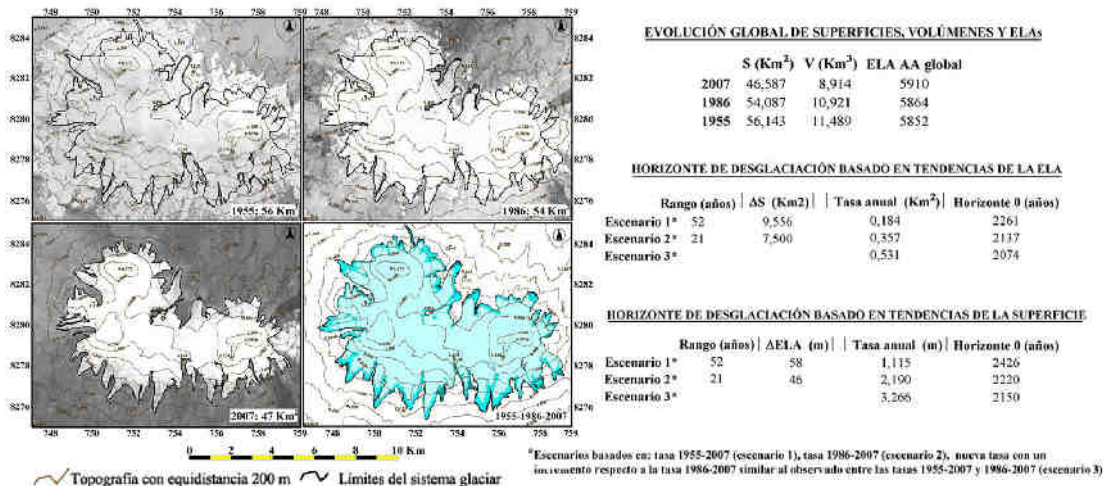


FIGURA 2

EVOLUCIÓN DE LOS GLACIARES DEL GRUPO NE: DELIMITACIÓN Y ELAS AABR

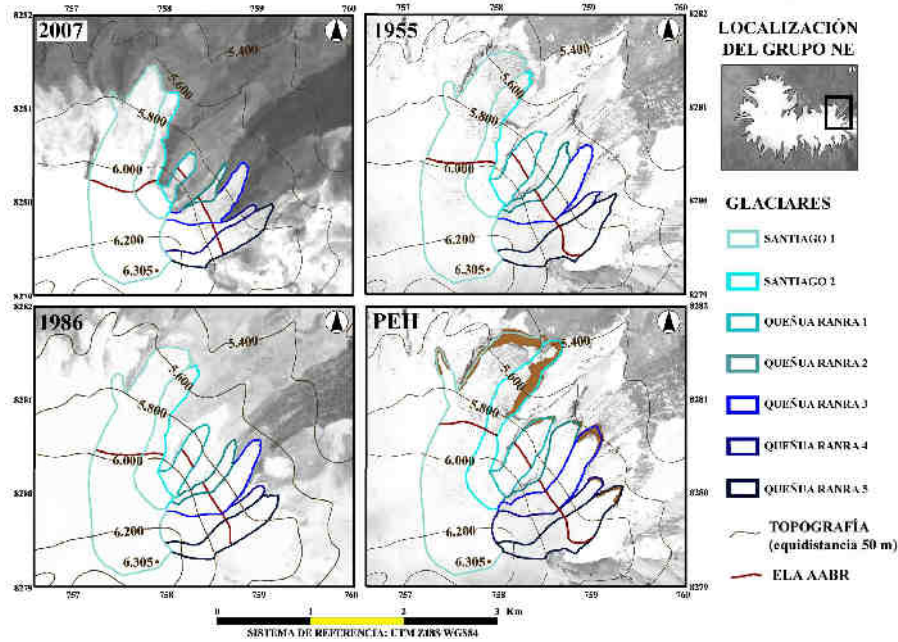


FIGURA 3

GLACIARES DE LAS QUEBRADAS SANTIAGO, QUEÑUA RANRA, CUANCAICHA-POMULLCA y POMULLCA-HUAIJRA HUIRE

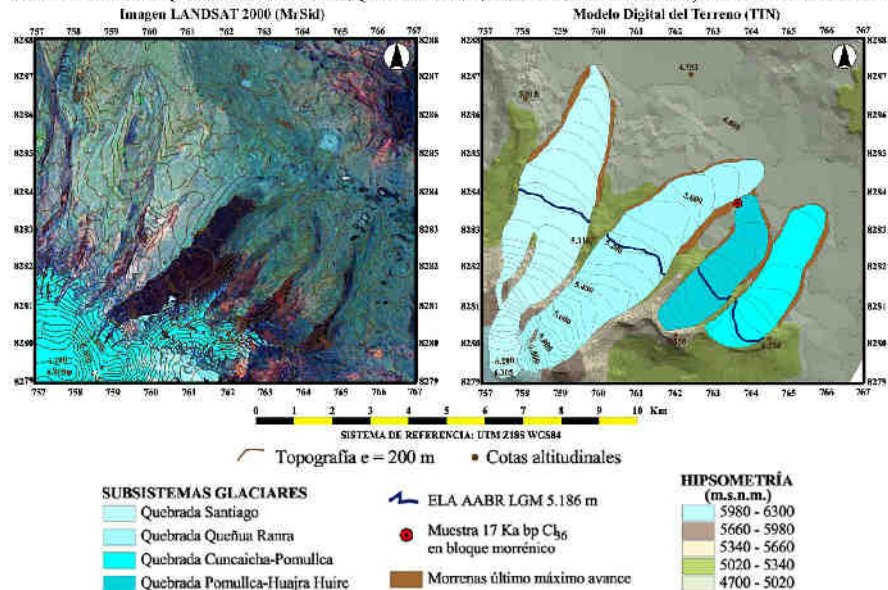
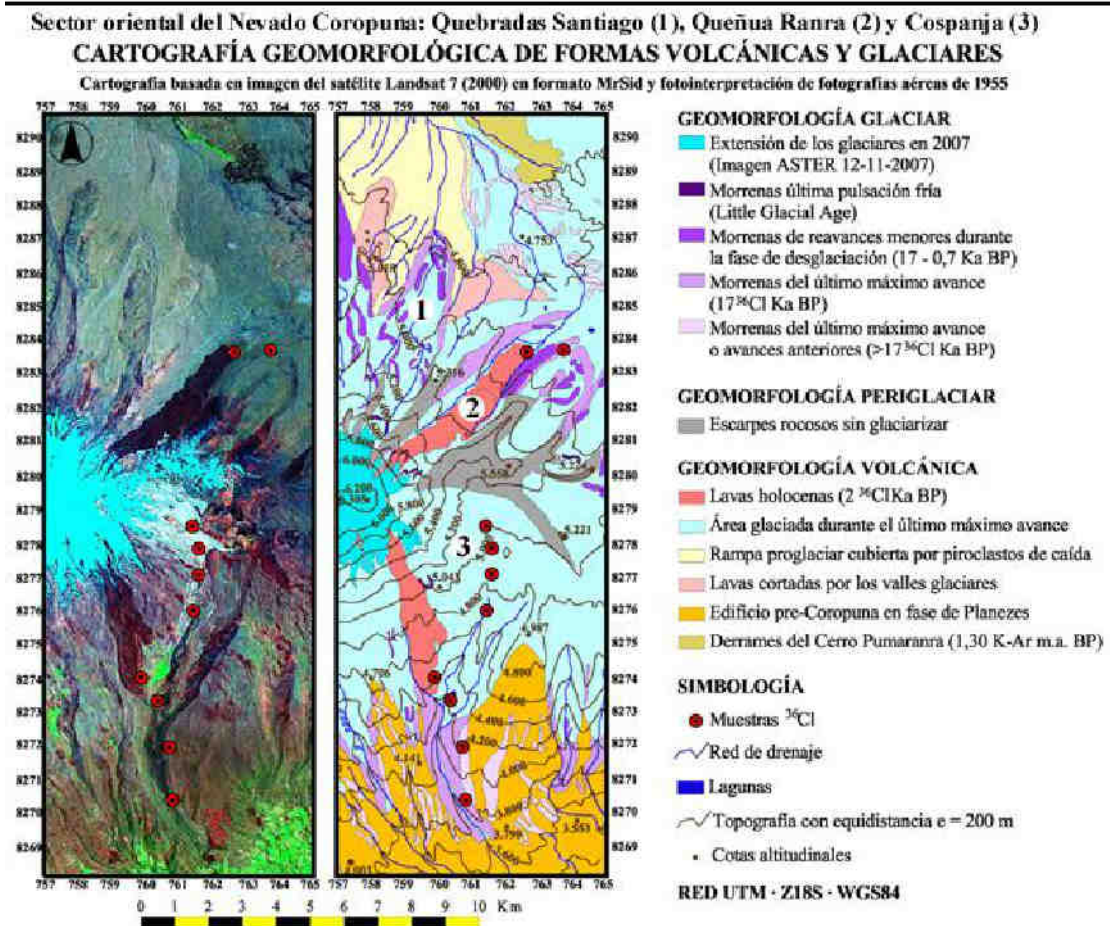






FIGURA 7



## CONCLUSIONES

El ensayo del método propuesto ha permitido modelizar la evolución de los glaciares utilizando como geoindicadores las variaciones observadas en sus superficies y ELAs. Los resultados del análisis a escala global (figura 1) son sólo una aproximación preliminar al problema. El análisis en detalle de los glaciares del grupo piloto (figuras 2-5) ha permitido obtener resultados más precisos. Los resultados constituyen el análisis más detallado de la evolución de los glaciares del Nevado Coropuna realizado hasta ahora, incluyendo además las primeras estimaciones sobre la cronología (~17 Cl<sub>36</sub> Ka BP) y la depresión de la ELA (~650-800 m) en la cordillera occidental de los Andes Centrales durante el LGM. Los pronósticos sobre el retroceso de los glaciares en el futuro (figuras 1, 4 y 5), el interés en el conocimiento de su evolución en el pasado y la cronología absoluta de la última fase de actividad volcánica (~2 Cl<sub>36</sub> Ka BP) sugieren la necesidad de profundizar en el conocimiento de la evolución del complejo volcánico y el sistema glaciar del Nevado Coropuna.

## PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN EN EL FUTURO

La estrategia de la investigación a corto plazo pretende: **6.1.** Analizar la evolución de dos grupos de glaciares localizados al SE y al O del complejo volcánico, empleando el mismo método que en los glaciares del grupo NE. **6.2.** Ampliar el registro de dataciones cosmogénicas (Cl<sub>36</sub>) procesando 12 muestras de formas volcánicas y glaciares recogidas en 2006 en las quebradas vinculadas con los glaciares de los grupos SE y O. **6.3.** Establecer el gradiente térmico altitudinal actual y determinar su relación con las ELAs (con datos de termómetros de aire y suelo instalados en 2007 en la quebrada de Queñua Ranra). **6.4.** Determinar el régimen de paleotemperaturas en todas las fases.

## REFERENCIAS

- Bahr, D.B., Meier, M.F. & Peckham, S.D., 1996. The physical basis for glacier volume-area scaling and implications for mass balance profiles. In: S.C. Colbeck (Editor), *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: a tribute for Mark F. Meier*. US Army CRREL, SR 96-27, Hanover.
- Fritz, S.C. et al., 2004. Hydrologic variation during the last 170,000 years in the southern hemisphere tropics of South America. *Quaternary Research*, 61: p. 95-104.
- Imbrie, J. et al., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}O$  record. In *Milankovitch and Climate*. Milankovitch and Climate: p. 269–305.
- Klein, A.G. & Isacks, B.L., 1998. Alpine glacial geomorphological studies in the Central Andes using Landsat Thematic Mapper Images. *Glacial Geology and Geomorphology*: p. 26.
- Lea, D.W., Pak, D.K. & Spero, H.J., 2000. Climate Impact of Late Quaternary Equatorial Pacific Sea Surface Temperature Variations. *Science*, 289(5485): p. 1719-1724.
- Meier, M.F. & Bahr, D.B., 1996. Counting glaciers: use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world. In: S.C. Colbeck (Editor), *Glaciers, Ice Sheet and Volcanoes: a tribute to Mark F. Meier*. US Army CRREL, S96-27.
- Osmaston, H., 2005. Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area x Altitude, the Area x Altitude Balance Ratio and the Area x Altitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International*, 22–31: p. 138–139.
- Smith, J., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T. & Klein, A.G., 2005a. Regional synthesis of last glacial maximum snowlines in the tropical Andes, South America. *Quaternary International*, p. 138–139: 145–167.
- Smith, J.A., Seltzer, G.O., Farber, D.L., Rodbell, D.T. & Finkel, R.C., 2005b. Early Local Last Glacial Maximum in the Tropical Andes. *SCIENCE*, p. 308.
- Úbeda, J., 2007. Caracterización Geomorfológica del sector septentrional de la Zona Volcánica Central de los Andes Centrales. Planteamiento de un caso de estudio: el sistema glaciario del complejo volcánico Nevado Coropuna. Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, p. 312.