

Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas

Parte 1
Glaciares y cambio climático

Parte 2
Glaciares y amenazas

César David López Arenas
Jair Ramírez Cadena
Compiladores



INGEOMINAS
INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

República de Colombia

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS

Hernán Martínez Torres
Ministro de Minas y energía

Mario Ballesteros Mejía
Director General

Edwin González Moreno
Secretario General

César David López Arenas
Director Técnico del Servicio Geológico

José Fernando Ceballos Arroyabe
Director Técnico del Servicio Minero

Orlando Navas Camacho
Subdirector de Geología Básica

Marta Lucía Calvache
Subdirectora de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental

© Instituto Colombiano de Geología y Minería

© Cada autor de los artículos

ISBN: 978-958-97896-9-8

César David López Arenas
Jair Ramírez Cadena
Compiladores

Coordinación editorial
Luis Eduardo Vásquez Salamanca

Diseño y diagramación
Andrés Leonardo Cuéllar Velásquez

Imagen de carátula
Nevado del Huila, Colombia
Archivo INGEOMINAS

Impresión Digital

BOGOTÁ, COLOMBIA

2010

VARIACIONES GLACIARES Y DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CORDILLERA BLANCA DEL PERÚ DESDE HACE 40 AÑOS

Thomas Condom¹

Wilson Suárez²

Alejo Cochachin Rapre³

Jesús Gómez³

Resumen

En el Perú, se observa un proceso de retroceso glaciar desde hace más de 30 años. El área de estudio de este artículo es la cordillera Blanca, la formación glaciar más importante del país, ubicada en el ramal occidental de los Andes del norte del Perú (latitud sur: 7° 57'-10° 13' y longitud oeste: 77° 17'-78° 18'). Usando el inventario de glaciares del Perú publicado por Hidrandina (1989), basado en fotografías aéreas para los años 1962 y 1970, y utilizando imágenes Aster para el lapso 2004-2006, se ha calculado que entre los periodos 1962-1970 y 2004-2006, la superficie glaciar para toda la cordillera Blanca ha pasado de 728 +/- 25 km² a 498 +/- 23 km², y que su volumen calculado por una relación empírica ha disminuido de 50 +/- 1,2 km³ a 31,2 +/- 0,75 km³. Además, una ecuación calibrada para el periodo actual (2003-2007) permitió calcular la Altitud de la línea de equilibrio (Equilibrium Line Altitude, ELA) en función de la temperatura y de la precipitación media anual. Usando dicha ecuación y las proyecciones climáticas para el horizonte (2020-2029) se propone un rango de la ELA, para esta etapa.

¹ Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Unidad Great Ice. Lima, Perú. thomas.condom@ird.fr.

² Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi). Lima, Perú.

³ Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú (Inrena). Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH). Perú.

Abstract

In Peru, a regression of the glaciers can be observed for more than 30 years. The study area of this article is the White Cordillera that composes the most important glacier formation of the country, located in the western branch of the Andes ($7^{\circ} 57' - 10^{\circ} 13'$ South Latitude; $77^{\circ} 17' - 78^{\circ} 18'$ West Longitude). Using the inventory of glaciers of Peru published by Hidrandina (1989) that proposes a glacier extension for the year 1962 and 1970 on the base of aerial photography and using images Aster for the period 2004-2006, it has been calculated that between these two periods (1962-1970 and 2004-2006), the glacier surface for the whole White Cordillera has decreased from $728 \pm 25 \text{ km}^2$ to $498 \pm 23 \text{ km}^2$, and that its volume calculated by an empirical relation has decreased from $50 \pm 1.2 \text{ km}^3$ to $31.2 \pm 0.75 \text{ km}^3$. In addition, an equation calibrated for the current period (2003-2007) allows to calculate the Equilibrium Line Altitude (ELA) with annual average temperature and rainfall. Using this equation and climatic projections for the future (2020-2029) one can propose a range of the future ELA.

Introducción

Aproximadamente el 99% de los glaciares tropicales del mundo se encuentran distribuidos en los Andes suramericanos, de los cuales el 71% se localizan sobre las cordilleras del Perú (G. Kaser & H. Osmaston, 2002). La cordillera Blanca, ubicada en el ramal occidental de los Andes del norte del Perú (latitud sur: $7^{\circ} 57' - 10^{\circ} 13'$ y longitud oeste: $77^{\circ} 17' - 78^{\circ} 18'$), es la cordillera glaciar tropical más elevada y extensa del mundo, concentra el 35% del total de los glaciares peruanos y se extiende en una longitud de 211 km (Zapata et ál., 2008).

En el Perú se viene observando desde hace más de 30 años un proceso de desglaciación a consecuencia del incremento de la temperatura global y de un decrecimiento de las precipitaciones que están conduciendo a la desaparición parcial o total de algunos glaciares.

A través del uso de imágenes (fotográficas y satelitales) se han realizado estudios sobre las variaciones de las superficies, que permiten calcular que la

extensión glaciaria para toda la cordillera Blanca ha pasado de $643 \pm 63 \text{ km}^2$ a $600 \pm 61 \text{ km}^2$ entre 1987 y 1996 (Silverio & Jacquet, 2005), o de 728 a 536 km^2 entre 1960 y 2003 (Hidrandina, 1989; Zapata et ál., 2008). En otros estudios se propone un funcionamiento hidrológico de la cuenca del río Santa actual y para su futuro, pero se concentran en la cuenca en sí y no específicamente en toda la cordillera Blanca (Juen et ál., 2007; Suárez et ál., 2008; Pouyaud et ál., 2005).

Por último, se tiene un estudio de las variaciones de volumen del hielo entre 1962 y 1999 para el nevado Queshque, que forma parte de la cordillera Blanca (Mark & Seltzer, 2005).

A la escala de toda la cordillera, en ningún estudio se analizan las variaciones de los volúmenes glaciares, y en el caso de la superficie no hay un cálculo reciente de la extensión de éstos. Además, no existe un consenso para dar una relación entre el clima y las variaciones de extensión glaciaria.

Objetivos

Los objetivos en este artículo son los siguientes: 1) calcular la extensión de los glaciares de la cordillera Blanca por el periodo 2004-2006, usando de imágenes Aster; 2) estimar las variaciones de extensión y de volumen entre los periodos 1962-1970 y 2004-2006 para los glaciares de la cordillera Blanca; 3) evaluar tres ecuaciones que permitan calcular las altitudes de las líneas de equilibrio (ELA) con base en la temperatura del aire y la precipitación promedio anual; 4) proponer algunas proyecciones de la posición hipotética de la ELA para la cordillera Blanca en el futuro (horizonte 2020-2029), sobre la base de los esquemas del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (GIEC).

Metodología

Esta parte está dedicada a la descripción de las metodologías usadas para cuantificar las variaciones de las extensiones de los glaciares de la cordillera Blanca en 40 años. Se recuerda que un glaciar tiene dos componentes ligados entre sí, que controlan sus variaciones de extensión y la posición de su fren-

te: 1) la dinámica del glaciar, porque el hielo es un fluido en escurrimiento, que depende de su pendiente, del volumen de hielo y de la cantidad de agua líquida en el glaciar, y de la interfaz entre el hielo y la roca de fondo; 2) su balance de masa, que depende del balance entre la acumulación (cantidades de agua que entran con la nieve, las avalanchas, etc.) y la ablación (cantidad de agua que sale con la fusión y sublimación). El balance de masa del glaciar está controlado por las precipitaciones y por su balance de energía. A la escala anual, se pueden definir dos zonas que dividen el glaciar; en primer lugar, la zona de acumulación, con un balance positivo, y en segundo término, la zona de ablación, con un balance negativo. El límite entre las dos zonas es la altitud de la línea de equilibrio.

Zona de estudio

La zona de estudio (figura 1) está situada en el ramal occidental de los Andes del norte del Perú (latitud sur: 7° 57'-10° 13' y longitud oeste: 77° 17'-78° 18'). Esta cordillera presenta en su flanco oeste el valle del río Santa y en su flanco este el valle del río Marañón. Su punto más alto es el nevado Huascarán, con una altura de 6768 m. Su extensión se hace de norte a sur sobre una longitud de 210 km.

Extensiones glaciares por los periodos 1962-1970 y 2004-2006

En este artículo se usaron dos fuentes de información. Para los años 1962-1970 se empleo el inventario de glaciares del Perú publicado por Hidrandina (1989). Este inventario determinó la superficie para cada glaciar de la cordillera Blanca, calculadas con base en 168 fotos aéreas (146 fotos tomadas en 1962 y 22 tomadas en 1970). Para el periodo 2004-2006 se utilizaron ocho imágenes ASTER (tres imágenes de 2004, tres de 2005 y dos de 2006).

Para el lapso 1962-1970, los procedimientos seguidos en el inventario de Hidrandina (1989) consistieron en registrar toda masa de hielo o nieve perenne con áreas mayores de 0,005 km² (media hectárea de extensión), individualizando cada una en relación con la cuenca de drenaje. Las fuentes de información utilizadas en la realización del inventario al nivel de la cordillera Blanca han sido las fotografías aéreas verticales del proyecto n.º AF-60-17 (en 1962) y fotografías aéreas verticales en infrarrojo de la Nasa en 1970.

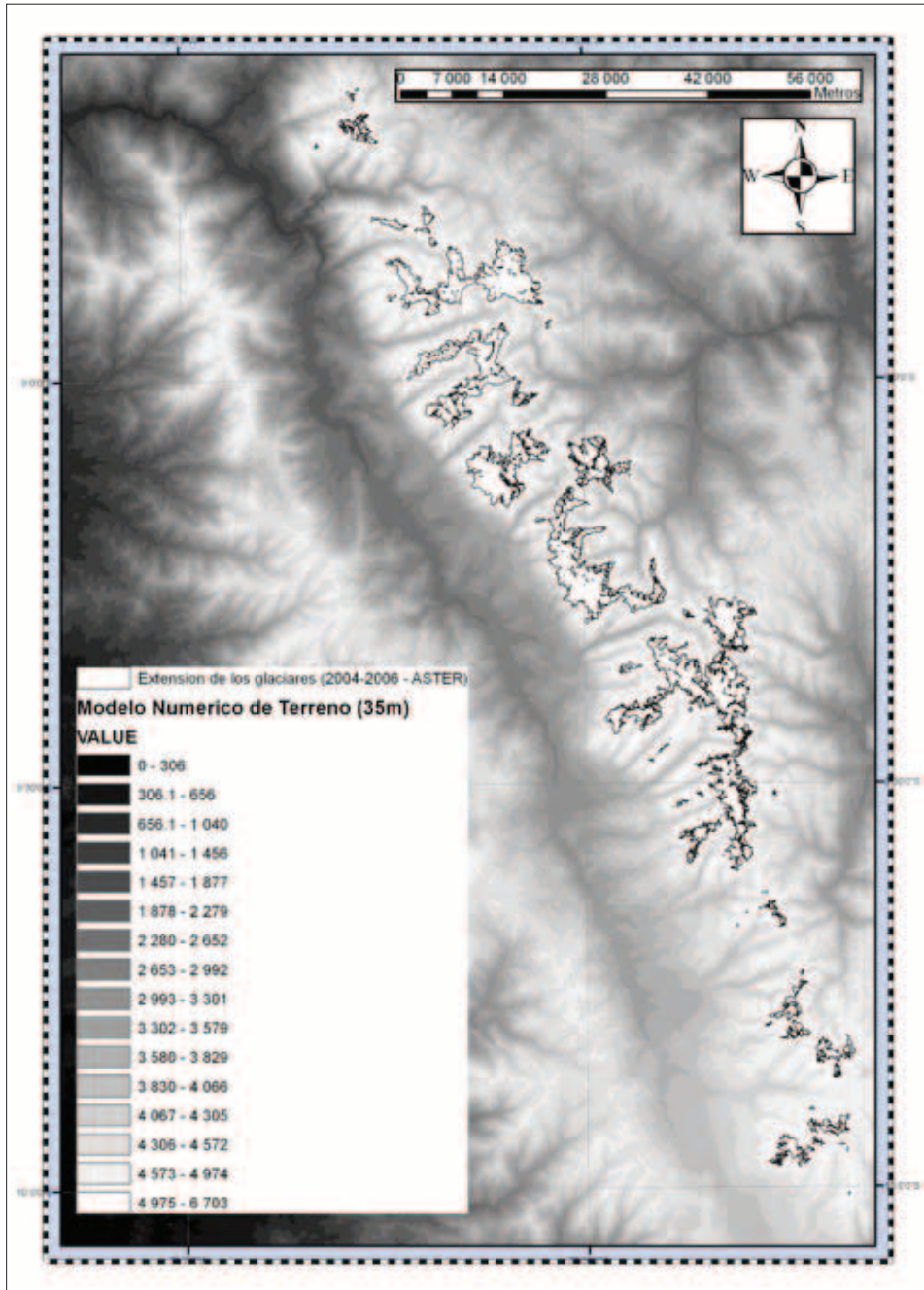


Figura 1. Zona de estudio con la cordillera Blanca en el 2006 y relieve deducido a partir de un Modelo Numérico de Terreno (MNT) con una resolución de 35 metros.

Fundamentalmente, la metodología se concentra en el uso de imágenes satelitales con la aplicación de tecnologías automatizadas para el tratamiento de información geográfica (sistemas de información geográfica), complementada con verificaciones de campo. Para el periodo reciente, se emplearon ocho imágenes Aster de nivel L1B, centradas sobre la cordillera Blanca (tres imágenes del 2004, tres imágenes del 2005 y dos del 2006) para calcular las áreas. Las imágenes tienen tres bandas con 15 metros de resolución en el visible y el próximo infrarrojo (VNIR), cinco bandas con 90 metros de resolución en el infrarrojo termal (TIR) y seis bandas con 30 metros de resolución en el infrarrojo medio o de onda corta. Una combinación de bandas 2,4 y 3 (VNIR y SWIR) ha permitido la separación a escala de la cobertura glaciar de la cordillera Blanca por el periodo 2004-2006. El tratamiento de las imágenes se efectuó con el sistema de información geográfica (SIG) ArcGis 9.2^o, teniendo en cuenta el siguiente procedimiento: ortocorrección y posición en el sistema Universal Transversal Mercator, zona 18 Sur con el datum WGS84; delimitación de los glaciares con un control de mapas topográficas, y codificación de los glaciares y cálculos de las superficies planas para cada glaciar (o cada polígono). La individualización de cada glaciar se hizo sobre la base de la separación de subcuencas, es decir, que cada glaciar tiene una salida de drenaje individual.

Con las áreas planas de los periodos 1962-1970 (fotos aéreas) y 2004-2006 (imágenes Aster), se puede calcular la regresión de los glaciares durante 40 años. En una segunda etapa es posible calcular las variaciones de volúmenes asociadas (ver parte siguiente).

Evaluación teórica de los volúmenes de los glaciares de la cordillera Blanca por los periodos 1962-1970 y 2004-2006

Los métodos para conocer de manera directa el volumen de un glaciar vienen de la geofísica, utilizando principalmente los métodos georradar y sísmico. A la escala de todo un macizo tal como el de la cordillera Blanca, resulta imposible investigar todos los glaciares; además, la configuración de las partes altas de los glaciares con fuertes pendientes haría la manipulación muy delicada. Proponemos estimar, con el uso de una relación empírica los volúmenes glaciares entre 1960 y 2006, empleando una simple ecuación que relaciona la superficie y el volumen de los glaciares para determinar directamente las variaciones de volúmenes con las variaciones de superficies.

La relación utilizada la propusieron Bahr et ál. (1996, 1997) y Klein & Isacks (1999):

$$V=c A^b$$

Donde A es la superficie del glaciar en km²; V el volumen de hielo en km³;
c un parámetro lineal (c= 0,048) y b un factor exponencial (b=1,36).

Esta ecuación se elaboró con datos de terreno (georradar) con base en el análisis de 144 glaciares situados en Europa, América del Norte, Asia central y ártica.

Relaciones entre ELA y clima (precipitación y temperatura)

La altitud de la ELA anual está directamente en función de la precipitación y de la temperatura. Cada año hidrológico (setiembre_(año n) – agosto_(año n+1)), la posición de la ELA tiene una variación hacia arriba en relación con la posición media si es que se tiene un año caliente o poca precipitación y a la inversa (hacia abajo) si el año es frío o con abundante precipitación. Una manera directa de conocer la posición de la ELA para un glaciar consiste en seguir una red de balizas en la zona de ablación, éstas son controladas cada mes para cuantificar en cada punto el aporte o la salida de agua, y en la zona de acumulación, una vez al año, se hace un “pit” para conocer la cantidad de nieve acumulada. Este método se conocerá como el *método directo* más adelante en el artículo.

Otra manera es el *método indirecto*, el cual se funda en la cantidad anual de precipitación y la temperatura promedio anual. La ventaja de este método es que permite relacionar el clima con el comportamiento glaciar. Varios autores han propuesto diferentes ecuaciones que relacionen la ELA, la precipitación y la temperatura. Se van a usar tres ecuaciones basadas en el método indirecto:

1. La ecuación de Greene et ál. (2002) establecida para las zonas tropicales:

$$ELA=537+1,01FH-0,51PA$$

Donde FH es la altura de la isoterma 0° y PA la precipitación anual en mm.año⁻¹.

2. La ecuación de Condom (2002) y Condom et ál. (2007) establecida para una zona intermedia de los Andes que va desde 10° de latitud norte hasta 55° de latitud sur.

$$ELA = 3427 - 1148 (\log_{10} (PA)) + FH$$

Con

$$FH = TA/0,065 + Al_{\text{estación}}$$

Donde TA es la temperatura promedio anual en grado y $Al_{\text{estación}}$ es la altitud de la estación de medición, el coeficiente de 0,065 es el gradiente altitudinal de temperatura.

3. La ecuación de Carrasco et ál. (2005) establecida para los glaciares chilenos

$$ELA (m) = 3104,9 - 920,24 (\log_{10} (PA)) + FH$$

Donde FH conserva los parámetros de la ecuación del numeral 2.

Resultados

Variaciones de superficies y de volumen entre los periodos

1962-1970 y 2004-2006

Los resultados presentados en la tabla 1 muestran que en el periodo 1962-1970 la superficie plana estaba en 728 +/- 25 km². Para calcular la incertidumbre, hemos considerado que había un error de 5%, y eso corresponde a un error posible de 15 metros al momento de la numerización de los polígonos glaciares. Para el periodo 2004-2006, sobre la base de las imágenes Aster (de 15 m de resolución espacial), hemos calculado una superficie total para toda la cordillera Blanca de 498 +/- 23 km².

Los volúmenes se calcularon usando la ecuación 1 (ver parte 2) para los dos periodos y por cada glaciar. Por el periodo 1962-1970, el volumen estimado con la fórmula empírica es de 50 +/- 1,2 km³ y en 2006 el volumen es igual a 31,2 +/- 0,75 km³.

Se debe recalcar que es muy importante tener cada glaciar individualmente para no sobrestimar el volumen total. En efecto, no se puede considerar toda la cordillera como un solo glaciar. En resumen, en 40 años, la reducción en

superficie plana fue de 32% (sea 230 km²) y la reducción en volumen fue de 37 % (sea 18,8 km³) (tabla 1).

Tabla 1. Superficies y volúmenes para los periodos 1962-1970 y 2004-2006

Periodo	Superficie en Km ²	Tipo	Fechas	Volúmen en Km2 con ecuación 1	Fuente
1962-1970	728 +/- 25	168 fotos aéreas	1962 (146); 1970 (22)	50 +/- 12	Hydrandina 1989
2004-2006	498 +/- 23	8 imágenes Aste'	2004 (3); 2005 (3); 2006 (2)	31,2 +/- 0,75	

Variación de la ELA-periodo 2002/2007

Este parte se focaliza sobre las variaciones de las posiciones de las altitudes de las líneas de equilibrio (ELA) durante el periodo 2002-2007 al nivel del glaciar Artesonraju (8,93° S, 77,60° W). Comparamos las ELA obtenidas desde las mediciones de las balizas (método directo) y de los “pits” con las ELA calculadas a partir de los datos de precipitaciones y de temperatura (ecuaciones 2, 3 y 5). La estación meteorológica está situada a algunos centenares de metros del frente glaciar. Los datos de precipitaciones vienen de un pluviómetro totalizador y se recolectan cada uno o dos meses, mientras que los datos de temperatura provienen de una estación automática con un paso de adquisición horario (localización de la estación meteorológica: 8,95° S; 77,64° W; altura de 4900 m). Por el periodo 2003-2007, las precipitaciones han fluctuado entre 986 y 1189 mm.año⁻¹ y las temperaturas entre 1,5 y 2 °C (tabla 1).

Tabla 2. Datos de precipitaciones y de temperatura para los años hidrológicos 2003-2007. Las ELA medidas están establecidas con las balizas y las ELA son las ELA calculadas con las fórmulas 2 (Green et ál., 2002), 3 (Condom, 2002 y Condom et ál., 2007) y 5 (Carrasco et ál., 2005).

Año	P. anual (mm/an)	T (°C) 4900m	ELA medida (m)	ELA cal. ec. 3 (m)	ELA cal. ec. 5 (m)	ELA cal. ec. 2 (m)
2003-2004	985	1,5	5049	5065	5425	5160
2004-2005	1108	1,5	5015	5005	5376	5096
2005-2006	1151	2	5050	4994	5369	5082
2006-2007	1189	1,9	4986	4976	5354	5061

Según la figura 2, observamos que las variaciones de las ELA medidas fluctúan poco entre 4986 y 5050 metros del 2003 hasta 2007. La comparación de los métodos que calculan las ELA con la precipitación y la temperatura anual muestran que las dos fórmulas que se acercan más a los datos de terreno son las ecuaciones 2 y 3, con diferencias máxima de cien metros en relación con los resultados del método directo. Eso se explica si consideramos que

estas ecuaciones se establecieron para las zonas tropicales. En cuanto a las prospectivas futuras de las ELA, los cálculos se efectuarían con la ecuación del numeral 3 (ver la siguiente parte).

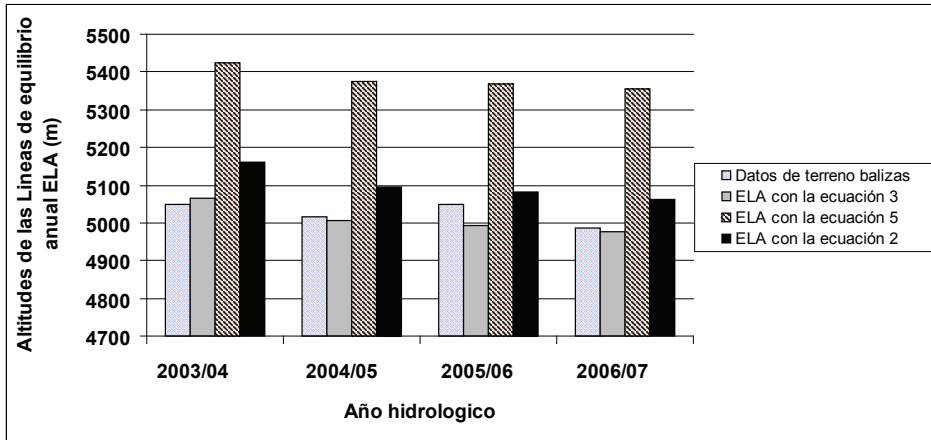


Figura 2. Variaciones de la ELA anual por los datos de terreno al nivel del glaciar Artesonraju, que resultan del uso de las ecuaciones 2, 3 y 5 y que utilizan datos de precipitación y de temperatura anual.

Proyecciones para 2020

Muchos científicos climatólogos trabajan sobre los cambios en relación con las variaciones de las precipitaciones y de la temperatura para el futuro, ya sea a escala global o regional. Para los Andes tropicales, la tendencia para la temperatura presenta un relativo consenso respecto a un aumento para el siglo que viene con un gradiente más o menos grande, pero las previsiones para las precipitaciones no son bien claras, ya sea para las cantidades anuales o también para la repartición durante el año (estacionalidad). Para proponer algunos esquemas futuros por las ELA, nos hemos basado en la ecuación del numeral 3 y en las proyecciones de temperatura y precipitación del IPCC 2007. En referencia a las temperaturas, se ha considerado un aumento comprendido entre 0,5 y 2 °C para el clima en 20 años y para las precipitaciones hemos considerado un aumento o una disminución (hasta 10% en relación con lo actual). Los resultados se presentan en la tabla 3 y muestran que la fluctuación de la ELA para la zona del Artesonraju podría tener un descenso de hasta casi 50 m para un escenario optimista, o bien un remonte de hasta

338 m, considerando el peor escenario para los glaciares (disminución de 10% de las precipitaciones y aumento de 2 °C de temperatura).

Tabla 3. Posiciones futuras de las ELA por el horizonte 2020-2029 en función de los esquemas del Giec.
 El primer grupo presenta los resultados considerando solamente una variación de la temperatura, el segundo grupo tiene en cuenta únicamente una variación de la precipitación y el tercer grupo presenta el escenario más desfavorable para los glaciares (aumento de temperatura y disminución de las precipitaciones máximas).

Futuro (2020-2029)		
Cambio T° anual		
Delta T (°C)	ELA calculada (m)	Delta ELA (m)
0,5	5139	72
1,5	5281	214
2	5353	286
Cambio P anual		
Delta P (mm)	ELA calculada (m)	Delta ELA (m)
-10%	5120	53
-5%	5093	26
5%	5043	-24
10%	5020	-47
Cambio P y T		
	ELA calculada (m)	Delta ELA (m)
T°C+2°C y P-10%	5405	338

Conclusiones y perspectivas

El contexto actual para los glaciares en los Andes es claramente a la regresión, y la cuantificación ha permitido calcular que durante los últimos 40 años (entre los periodos 1962-1970 y 2004-2006), la superficie para toda la cordillera Blanca ha pasado de 728 +/- 25 km² a 498 +/- 23 km², y que el volumen calculado por una relación empírica ha disminuido de 50 +/- 1,2 km³ a 31,2 +/- 0,75 km³. Además, para demostrar la relación que existe entre el clima y el funcionamiento de los glaciares, hemos probado algunas fórmulas que permiten calcular las ELA en función de la precipitación y de la temperatura anual. La comparación con datos de terreno ha mostrado que las fórmulas calibradas para la zona tropical dan buenos resultados (menos de cien metros de diferencia entre lo calculado y lo medido). Se ha retenido una ecuación calibrada que permite hacer proyecciones futuras, a través de la cual se observa que en el escenario más desfavorable para los glaciares (disminución de 10% de precipitaciones y aumento de 2 °C en relación con las condiciones actuales), para el horizonte

2020-2029 ocasionaría una subida del orden de 340 m de la ELA en el nevado Artesonraju. El orden de tamaño del retroceso del frente glaciar debería ser igual. La estrategia de la investigación a corto plazo pretende estudiar en detalle localización de los retrocesos más importantes y analizarlos con diferentes variables (pendiente, exposición y naturaleza geológica), y comparar el volumen perdido de la cordillera Blanca desde hace 40 años con los volúmenes escurridos de los dos principales ríos que la flanquean: el río Santa por el lado occidental (cuenca pacífica) y el río Marañón por el lado oriental (cuenca amazónica). A mediano plazo, habría que extender este estudio hecho para la cordillera Blanca a todo el Perú (19 cordilleras nevadas). Efectivamente, la evaluación de las extensiones y de los volúmenes actuales de agua dulce de origen glaciar es importante para identificar las zonas deficitarias y las de potencial hídrico, lo cual contribuirá a generar estrategias y políticas en el uso sostenible de los recursos hídricos en el Perú.

Agradecimientos

Damos gracias a INGEOMINAS por apoyo prestado al grupo de trabajo Hielo, Nieve y Caribe durante el evento de Manizales 2008, y en particular al ingeniero Jair Ramírez por toda la organización de este encuentro. Así como también a los ingenieros Guillermo Tataje y Héctor Vera, del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), por la participación en el procesamiento de las imágenes Aster del 2006. Finalmente, agradecemos al ingeniero Marco Zapata, director de la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) del Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú (Inrena), por su gran colaboración en las investigaciones en glaciología. ■

Referencias Bibliográficas

- 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 (ed.). *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: a tribute for Mark F. Meier*. US Army CRREL, SR 96-27. Hanover.
- Bahr, D. B., Meier, M. F. & Peckham, S. D. (1997, September). The physical basis for glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research*, 102(B9), 20355-20362.
- Carrasco, J. F., Casassa, G. & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 °C isotherm and the equilibrium line altitude in the central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (6), 933-948.
- Condom, T. (2002). Dynamique d'extension lacustre et glaciaire associées aux modifications du climat dans les Andes Centrales. PhD Thesis. University of Paris VI, Pierre et Marie Curie. France.
- Condom, T., Coudrain, A., Sicart, J. E. & Sylvain, T. (2007). Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10° N-55° S). *Global and Planetary Change*, 59, 189-202.
- Greene, A.M., Seager, R. & Broecker, W. S. (2002, April). Tropical snowline depression at the Last Glacial Maximum: comparison with proxy records using a single-cell tropical climate model. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107, Issue: D7-8, article number 4061.
- Hidrandina (1989). Inventario de glaciares de Perú. Fuente: fotografías aéreas de 1962, 1963, 1970.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Climate change: impacts, adaptation and vulnerability summary for policy makers and technical summary for working group II report. Geneva: IPCC.
- Juen, I., Kaser, G. & Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59, 37-48.
- Kaser, G. & Osmaston, H. (2002). Tropical Glaciers. Cambridge: Cambridge University Press.
- Klein, A. G. & Isacks, B. L. (1998). Alpine glacial geomorphological studies in the Central Andes using Landsat Thematic Mapper Images. *Glacial Geology and Geomorphology*, 26.
- Mark, B. & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24, 2265-2280.
- Pouyaud, B., Zapata M., Yerren, J., Gómez, J., Rosas, G., Suárez, W. & Ribstein, P. (2005). Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanca. *Hydrological Sciences* 50(6).
- Silverio, W. & Jaquet, J. M. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the cordillera Blanca (Perú). *Remote Sensing of Environment*, 95, 342-350.

Suárez, W., Chevallier, P., Pouyaud, V. & López, P. (2008). Modelling the water balance in the glacierized Paron Lake basin (White cordillera, Perú). *Hydrological Sciences*, 53.

Zapata, M., Arnaud, Y. & Gallaire, R. (2008). Inventario de glaciares de la cordillera Blanca. 13th IWRA World Water Congreso, 1-4 September. Montpellier, France.