



XVIII Congreso Peruano de Geología

EVOLUCIÓN GLACIAL A FINALES DEL HOLOCENO EN LOS NEVADOS SALCANTAY, HUAMANTAY Y TUCARHUAY EN LA CORDILLERA DE VILCABAMBA – CUSCO.

Ronald Concha¹

(1) INGEMMET, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima-Perú.

1. Introducción

El parámetro que mejor expresa la relación de los glaciares con el clima es la Altitud de la Línea de Equilibrio o *Equilibrium Line Altitude* (ELA). La ELA es una línea teórica que separa la zona de acumulación de un glaciar, donde predominan los procesos que favorecen la ganancia de masa, de la zona de ablación donde prevalecen los fenómenos que provocan pérdida de masa. La ELA es un concepto estadístico que puede referirse a diferentes escalas, en el espacio y en el tiempo (Kaser & Osmaston, 2002).

La presente investigación, ensaya un método para calcular la ELA de los glaciares actuales (2014) en los nevados Salcantay, Huamantay y Tucaruay, y su paloELA correspondiente a la Pequeña Edad de Hielo (PEH), para conocer su variación y estimar su comportamiento en el futuro. La PEH, fue el último periodo frío globalmente reconocido, que en los Andes Centrales tuvo lugar entre los años ~1500 y 1890 según indican los isótopos de oxígeno en los testigos de hielo del glaciar Quelcaya (Thompson et al., 1986). En la zona de estudio, los registros de la PEH fueron reconocidos por observaciones geomorfológicas, que fueron corroboradas por dataciones cosmogénicas ¹⁰Be de bloques morrénicos (Licciardi et al., 2009), las cuales asignan en promedio al año 1773±43 años como la culminación de dichos avances.

Mediante el análisis de las ELAs y paleoELAs, se determinó la variación de la temperatura desde la PEH, comparando ese dato con el calentamiento del clima desde finales del siglo XIX, deducido de datos instrumentales (IPCC, 2013). Las ELA actual también se comparó con datos instrumentales de monitoreo de balance de masa (Autoridad Nacional del Agua, 2009).

La presente investigación se realiza en el marco del proyecto CIENCIACTIVA 144-2015 (INGEMMET – FONDECYT).

2. Área de Estudio

Los nevados Salcantay (6271m), Tucaruay (5910m) y Huamantay (5473m) están situados en la Cordillera de Vilcabamba, en los Andes orientales del sur del Perú, ~ 60 km al noroeste de la ciudad del Cusco (fig. 1). Las masas de hielo que se forman en sus laderas, abastecen de agua a los ríos Urubamba y Apurímac que son tributarios de la red fluvial del río Amazonas. En el fondo de los valles adyacentes a los mencionados nevados, se pueden observar morrenas bien conservadas, depositadas durante el último avance de las masa glaciares (PEH).



Fig. 1: Localización del área de estudio.

3. Metodología

3.1. Reconstrucción de ELAs actuales y pasadas

En primer lugar se elaboró un mapa de la geomorfología glacial (fig. 2), delimitando y midiendo las superficies de los glaciares actuales (2014) y cartografiando morrenas formadas durante el último avance los glaciares (PEH), para poder reconstruir la máxima extensión de los paleoglaciares en ese periodo. A continuación se reconstruyeron sus ELAs y paleoELAs empleando el método *Area x Altitude Balance Ratio* (AABR) propuesto por (Osmaston, 2005), que es considerado el mejor procedimiento (Benn et al., 2005). El método AABR consta de cinco fases (a-e), que se desarrollaron en un entorno operativo ARCGIS-EXCEL:

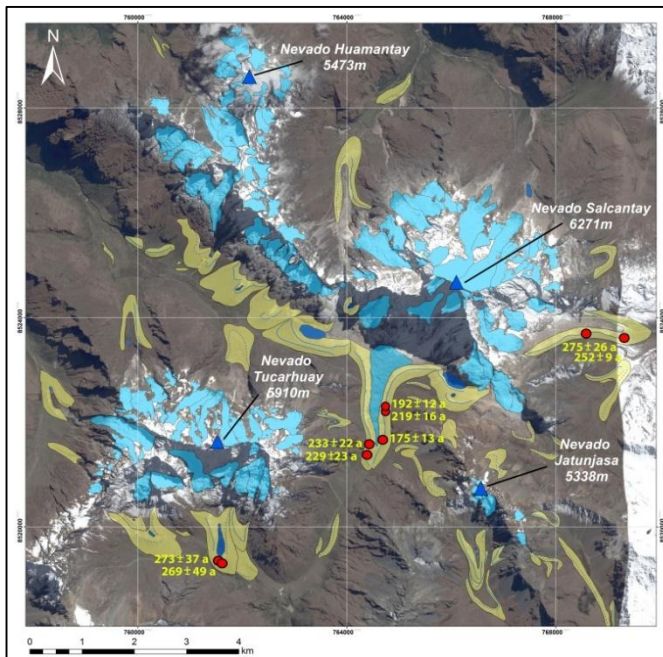


Fig. 2: Mapa de la geomorfología glacial, mostrando en color celeste, la extensión de los glaciares en 2014, en color amarillo las morrenas atribuidas a la PEH y con puntos rojos las dataciones ^{10}Be realizadas por (Licciardi, 2009).

- Delimitación y medida de la superficie de los glaciares y paleoglaciares y sus bandas altitudinales, reconstruyendo la paleotopografía de los valles para representar cuando estos se encontraban llenos de hielo durante la PEH.
- Estimación de la ELA por el método *Area x Atitude* (Kurowski, 1891), resolviendo la ecuación propuesta por (Sissons, 1974, 1980) para simplificar los cálculos:

$$ELA = \Sigma (Z \cdot S) / \Sigma S$$

Dónde:

$\Sigma (Z \cdot S)$ - sumatoria de los productos de la altitud media de las bandas altitudinales (m) por su superficie (m^2).

ΣS - sumatoria de las superficies de todas las bandas altitudinales (m^2).

- Ponderación de los resultados con diferentes valores de *Balance Ratio* (BR), un parámetro que expresa la

relación entre los gradientes de acumulación y ablación a lo largo del perfil longitudinal del glaciar.

- Tabulación de los resultados de las ELAs y paleoELAs en series vinculadas con los valores de BR empleados para su estimación, y cálculo de promedios y la desviación estándar de cada serie.
- Selección del resultado de la ELA vinculado con una menor desviación estándar (σ), que se considera el valor más probable de la ELA o la paleoELA (Osmaston, 2005).

3.1. Evaluación de la variación de la temperatura desde la PEH

Para estimar la variación de la temperatura, se aplicó la ecuación propuesta por (Úbeda, 2011):

$$\Sigma T = GTV \cdot \Delta ELA$$

Dónde:

ΣT - variación de la temperatura desde la PEH ($^{\circ}\text{C}$).

GTV - gradiente térmico vertical ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$).

ΔELA - desnivel de la paleoELA con respecto a la ELA actual (m).

El gradiente térmico vertical (GTV), es la variación de la temperatura del suelo o del aire, respecto a la altitud. Para la presente investigación se utilizó el valor medio de la Tierra ($6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$), que (Kaser & Osmaston, 2002) consideraron válido para los trópicos y (Úbeda et al., 2015) comprobaron que ofrecía buenos resultados en la cordillera Occidental de los Andes Centrales.

Para comprobar la validez del procedimiento, la variación de la temperatura deducida de las ELAs y paleoELAs se comparó con datos instrumentales del calentamiento global ($0,85^{\circ}\text{C}$, diferencia entre los promedios de los años 1880 y 2012 - IPCC, 2013).

4. Resultados

Se delimitaron 139 glaciares actuales, y se reconstruyeron 69 paleoglaciares, que suman superficies de 13.17 y 28.26 km^2 , respectivamente, mostrando una reducción del 54.4% de la superficie glacial entre ambos escenarios (fig. 3).

Las reconstrucciones de las ELAs y paleoELAs y la variación de la temperatura desde la PEH, se realizó por separado para cada orientación de los flancos de las montañas (NE, SE, SO y NO). Obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 1.

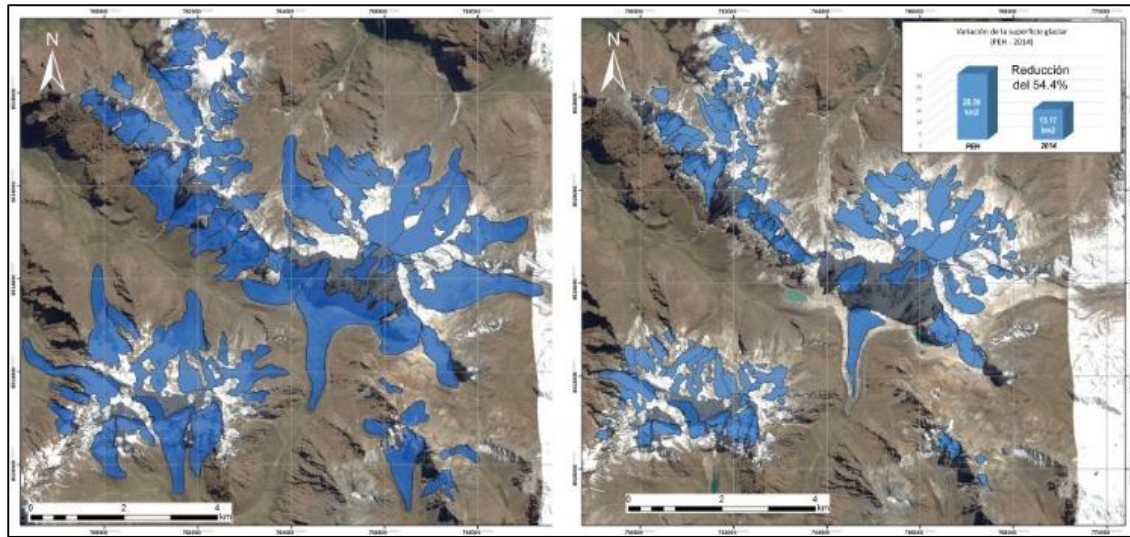


Fig. 3 : Variación de la superficie glaciar desde la PEH.

Orientación de Vertientes	Nro. de glaciares	Nro. de paleo glaciares	Área de glaciares en 2014 (km ²)	Área de glaciares en la PEH (km ²)	Variación del Área (ΔA) km ²	Variación del Área en (km ² /año)	ELA 2014	ELA PEH	Variación o desnivel de la ELA (ΔELA) m	Variación de la ELA en (m/año)	Variación de la T° (ΔT) °C
I - NE	35	14	3.31	5.82	2.51	0.012	5232	5005	227	1.124	1.48
II - SE	22	14	1.61	4.39	2.78	0.014	5231	4983	248	1.228	1.61
III - SO	37	24	4.41	11.7	7.29	0.036	4956	4740	216	1.069	1.4
IV - NO	45	17	3.84	6.35	2.51	0.012	5090	4870	220	1.089	1.43
Total	139	69	13.17	28.26	15.09	0.075	5127	4900	227.75	1.127	1.48

Tabla 1 : En amarillo, se muestran las variaciones de la superficie de los glaciares para ambos escenarios, en celeste la variación de las ELAs y en verde la variación de la temperatura desde la PEH.

5. Discusión y Conclusiones

Las ELAs calculadas en esta investigación, son más bajas respecto a las obtenidas en otras áreas de la cordillera Occidental (tabla 2). Esto puede atribuirse al incremento de la aridez en la cordillera Occidental y la mayor precipitación en la cordillera Oriental, como consecuencia de la distancia respecto a la Amazonía (área fuente de las precipitaciones) y demás de que el comportamiento de la ELA es inversamente proporcional a la latitud.

ÁREA DE ESTUDIO	CORDILLERA	LATITUD	ELA PROMEDIO (m)
Nevados Salcantay, Huamantay y Tucaruay	Vilcabamba (Oriental)	13°20'	5127
Nevado Sulcón	Central (Occidental)	11°54'	5187
Cuenca Parón	Blanca (Occidental)	8°58'	5264

Tabla 2: Comparación de la ELA de la presente investigación, con las ELAs promedio de otras áreas de estudio (Vásquez P., et al., 2016).

La ELA obtenida, se comparó también con la ELA de monitoreo realizada en el glaciar Incachiriasca ubicado en la vertiente sur del nevado Salcantay. En este glaciar se obtuvo una ELA de 4979m (Autoridad Nacional del Agua, 2009), que difiere en 23m de los 4956m obtenidos en esta investigación para los glaciares con orientación SO.

Esta diferencia puede deberse a que el método empleado en este trabajo, muestra la ELA promedio de todo un conjunto de glaciares, a diferencia de la ELA de monitoreo que analiza una única masa glaciar.

El promedio de los datos de variación de la temperatura desde la culminación de la PEH (año 1773±43) fue de 1.48°C. El incremento de la temperatura global durante el periodo 1880 – 2012 deducida de datos instrumentales, fue de 0.85°C (IPCC, 2013). Estos resultados muestran un incremento constante de la temperatura desde finales de la PEH.

Como conclusión final, los resultados del presente trabajo son consistentes respecto a las otras investigaciones, por lo que nos permite validar provisionalmente las ecuaciones empleadas, en espera de realizar más estudios en nuevas áreas de la cordillera Oriental.

Agradecimientos

- Al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
- Al Grupo de investigación de Geografía Física de Alta Montaña GFAM, de la Universidad Complutense de Madrid.
- Al proyecto de investigación básica de CIENCIACTIVA, realizada mediante el convenio 144-2015 (INGEMMET – FONDECYT) (<http://cryoperu.pe/>).

Referencias

- Autoridad Nacional del Agua 2009. Monitoreo del glaciar Incachiriasca, nevado del Salcantay cordillera de Vilcabamba.
- Benn, D. I., Owen, L. A., Osmaston, H. A., Seltzer, G. O., Porter, S. C., and Mark, B. G., 2005, Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers: *Quaternary International*, v. 138-139 (2005), p. 8-21.
- Concha R., 2015. Evolución Glaciar a Finales del Holoceno en los nevados Salcantay y Huamantay, y su impacto frente al Cambio Climático (Cusco – Perú). Tesis de Ingeniería: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 107 p.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Kaser, G., and Osmaston, H., 2002, *Tropical Glaciers*, Cambridge (U.K.), Cambridge University Press, International Hydrology Series, 207 p.:
- Kurowski, L., 1891, Die Höhe der Schneegrenze: *Geogr. Abh.*, v. 5 I (124), p. 119-160.
- Licciardi, J. M., Schaefer, J. M., Taggart, J. R., and Lund, C. D., 2009, Holocene glacier fluctuations in the Peruvian Andes indicate northern climate linkages: *Science*, v. 325, p. 1677–1679.
- 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*, v. 22–31, p. 138–139.
- Sissons, J. B., 1974, A late glacial Ice Cap in the central Grampians, Scotland.: *Transactions of the Institute of British Geographers*, v. 62, p. 95-114.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. E., Dansgaard, W., and Grootes, P. M., 1986, The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap: *Science*, v. 234, p. 361-364.
- 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 p.
- Úbeda, J., Palacios, D., Campos, N., Giraldez, C., García, E., and Quiros, T., 2015, Evaluation of Little Ice Age cooling in Western Central Andes, suggested by paleoELAs, in contrast with global warming since late 19th century deduced from instrumental records, *Geophysical Research Abstracts*, Volume 17, p. EGU2015-13835-13833.
- Vásquez, P., 2016, El registro glacial del cambio climático en el Macizo Sulcón (sector septentrional de la Cordillera Pariaqaqa) [Tesis de Ingeniería: Universidad Nacional del Altiplano (Puno), 92 p.