



Determinación de la variación espacio-temporal de la altura de la línea de equilibrio de los glaciares de la Cordillera Blanca, Perú

Estimation of spatio-temporal variation in the height of the equilibrium line of the glaciers in the Cordillera Blanca in Peru

EDWIN LOARTE*¹, ANTOINE RABATEL² & JESUS GOMEZ³

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo/Facultad de Ciencias del Ambiente, Ancash, Huaraz, Perú

²Universidad Grenoble Alpes, CNRS, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, LGGE UMR 5183,F38000 Grenoble, Francia

³Servicio Nacional de Áreas Protegidas/Parque Nacional Huascarán, Ancash, Huaraz, Perú

RESUMEN

En los últimos años, a consecuencia del cambio climático se están registrando diversas alteraciones en los ecosistemas; uno de estos cambios se evidencia sobre los glaciares, provocando la fusión acelerada de sus masas de hielo y nieve, consecuentemente genera diversos riesgos para las poblaciones y conflictos por la disponibilidad del agua. En esta investigación se plantea determinar la variación espacio-temporal de la Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) obtenida a través de la Altitud de la Línea de Nieve (SLA) de los glaciares de la Cordillera Blanca. Para ello se seleccionó 17 glaciares de donde se obtuvieron valores de SLA, durante el periodo 2001–2010, mediante análisis y técnicas de procesamiento de imágenes satelitales para la discriminación entre hielo y nieve. Para la validación se utilizó información de 4 glaciares de la Cordillera Blanca. Los resultados obtenidos de la ELA promedio a nivel de cordillera obtenidos a través de la SLA fue de ~ 4920 ms.n.m. Estos datos de ELA fueron comparados con parámetros climáticos y morfotopográficos, evidenciando su influencia en la variación espacio-temporal de las ELA (determinada por la SLA) que hacen que la ELA se presente de manera fluctuante entre un año y otro, pero con una tendencia de ascenso (~ 11 m/año), lo que representa una significativa reducción de masa glaciar.

Palabras claves: SLA, ELA, Balance de masa, Landsat, ASTER GDEM, Cordillera Blanca.

ABSTRACT

In recent years, several changes in ecosystems have been registered due to climate change; one of these changes can be seen in glaciers retreat, causing accelerated melting of the ice and snow masses, which represents serious risks to populations and arising of conflicts over water availability. This research aims at determining the spatio-temporal variation of the equilibrium line altitude (ELA) obtained through the snowline altitude (SLA) of the glaciers of the Cordillera Blanca. To this end, 17 glaciers were selected from which the SLA values were obtained for the period 2001–2010, through analysis and processing techniques of satellite imagery for discrimination between ice and snow. For validation purposes, information from four glaciers of the Cordillera Blanca was used. The obtained result for an average ELA, for the mountain range using the SLA was ~ 4920 m a.s.l. This ELA data was compared to the climate and morpho-topographic parameters, showing the influence on the spatio-temporal variation of the ELA (determined by the SLA) which causes a fluctuating ELA from one year to another, but with a rising trend (~ 11 m/year), representing a significant reduction in glacier mass.

Keywords: SLA, ELA, Mass equilibrium, Landsat, ASTER GDEM, Cordillera Blanca.

*edw_66@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

En el Perú, uno de los mayores impactos del cambio climático es la acelerada fusión de los glaciares, fuente importante de agua para las cuencas de alta montaña. En este aspecto el Perú es altamente vulnerable, debido a que el 71% de la superficie de los glaciares tropicales del mundo se ubican en el Perú (Kaser, 1999); y el 27% de la superficie glaciar ha desaparecido entre 1970 y el 2003 (UGRH, 2010; Rabatel et al., 2013).

El estudio de las reservas hídricas es indispensable para realizar una adecuada gestión (Zamora, 1983; Zapata, 2002); estos estudios proporcionan datos de variaciones a escala media (meso) y gran escala (macro); de esta manera la variabilidad espacial y temporal de los glaciares frente al cambio climático es percibido en un contexto regional y local. Por ello, el monitoreo de los glaciares mediante técnicas de mediciones glaciológicas (trabajos en campo) y complementadas con información a través de imágenes satelitales es de vital importancia.

Para analizar la evolución de los glaciares es preciso evaluar su estado en diferentes épocas mediante indicadores que permitan examinar sus variaciones a lo largo del tiempo. Junto con el balance de masa, uno de los parámetros glaciológicos que mejor ha caracterizado la evolución de un glaciar es la Altura de la Línea de Equilibrio (ELA, por su sigla en inglés) (Andrews, 1975), obtenida a través de datos de medición del balance de masa en un glaciar. Esta medición requiere de grandes expediciones con bastante mano de obra y alto financiamiento por lo que la obtención de información de balance de masa se restringe solo para algunos glaciares, además no se puede conseguir una muestra representativa a nivel de una cordillera. Sin embargo, dada la necesidad de obtener datos para conocer la evolución de los glaciares de la Cordillera Blanca, se complementó los estudios de los glaciares realizados en campo con la medición de la Altura de la Línea de Nieve (SLA, por su sigla en inglés) obtenida en la época seca, temporada cuando la SLA puede ser considerada, bajo algunas limitaciones, como representativa de la ELA (Paterson, 1994; Rabatel et al., 2005, 2008, 2012). Para la obtención de datos de la SLA se usaron técnicas de teledetección, complementadas y validadas estadísticamente con las ELA obtenidas de los glaciares monitoreados en campo por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) del ANA.

El objetivo de este trabajo es determinar la variación espacio-temporal de la altura de la Línea de Equilibrio a través SLA de los glaciares de la Cordillera Blanca, durante el periodo 2001–2010.

METODOLOGÍA

Ámbito de estudio

La Cordillera Blanca se localiza en los Andes Centrales del continente Suramericano, sus límites están comprendidos entre las coordenadas 7°41'31" a 10°10'57" de latitud sur y 76°54'57" a 78°18'1" de longitud oeste (Figura 1). Esta región de los Andes del territorio peruano se divide en tres sectores: norte, centro y sur; los glaciares de la Cordillera Blanca se encuentran en el ramal occidental del sector norte y se prolonga en dirección noroeste, desde el nevado Rajutuna hasta el nevado Pelagatos, con una longitud lineal aproximada de 210 km. La Cordillera Blanca se ubica entre los departamentos de La Libertad y Ancash, este último alberga en casi su totalidad los glaciares. En el 2003, se tenían 755 glaciares con una superficie de $\sim 528 \text{ km}^2$, concentrándose la mayor proporción en la cuenca del río Santa con 548 glaciares que representan el 68% de la superficie glaciar (ANA–UGRH, 2010).

Fuentes de datos

Imágenes satelitales ópticas y Modelo de elevación digital

Las imágenes satelitales Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ fueron obtenidas del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil y del Global Visualization Viewer–GloVis (USGS) de EE. UU.

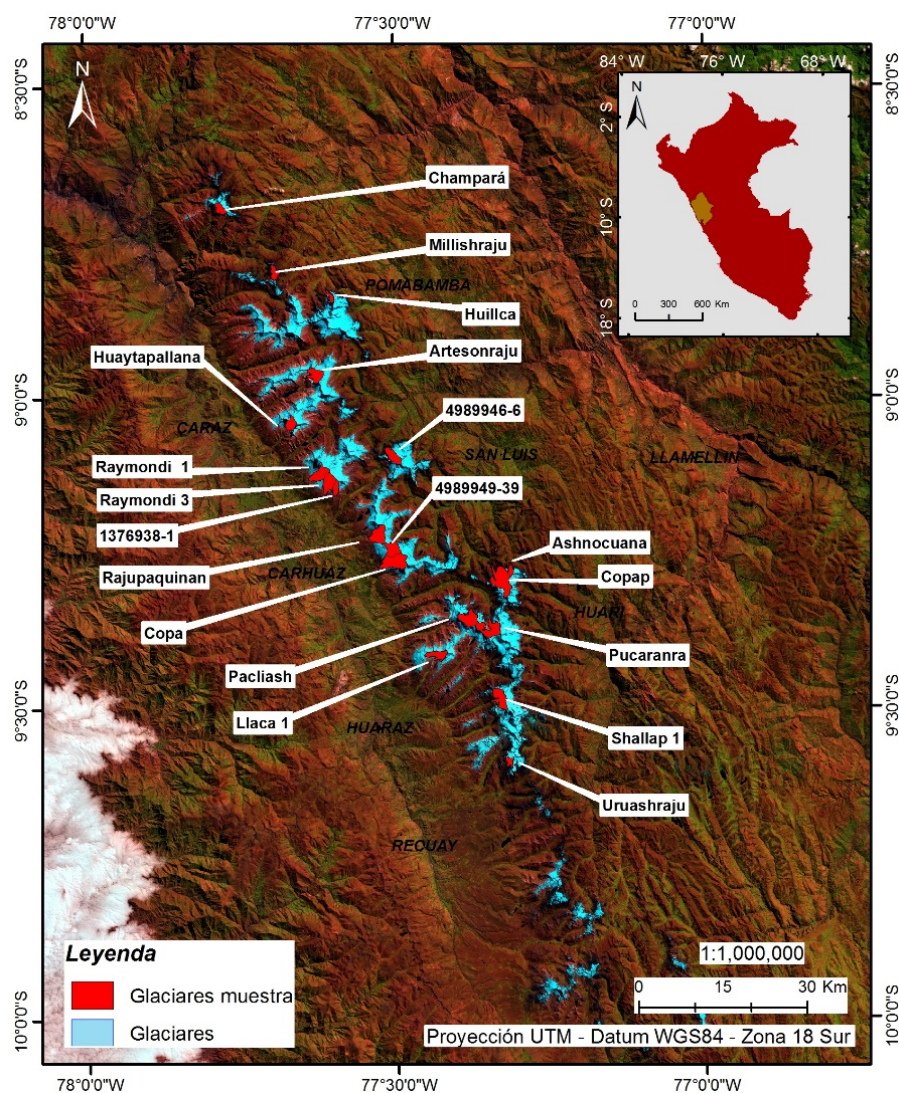


Fig. 1. Ubicación de la Cordillera Blanca y de los glaciares estudiados. Algunos glaciares muestran sus códigos (según la UGRH) al no contar con nombres

Las imágenes obtenidas corresponden a la temporada seca, desde mayo hasta agosto durante el periodo 2001–2010.

El Modelo de elevación digital (GDEM), proveniente de pares estéreos de las imágenes satelitales ASTER, fue obtenido de manera gratuita del portal web de Earth Remote Sensing Data Analysis Center. Parámetros climáticos y morfotopográficos

Los datos de temperatura superficial del mar en los sectores: Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4 se obtuvieron del sitio web de la NOAA. Los datos de temperatura de reanálisis a diferentes niveles, de European Climate Assessment & Data.

Los datos morfotopográficos (pendiente, orientación, altura promedio y sky view factor) fueron obtenidos del GDEM. Para el área superficial se consideraron los datos del inventario de glaciares de la Cordillera Blanca desde el año 2003.

Valores de ELA de glaciares monitoreados

Estos datos (Valores de ELA) contemplan los balances de masa de los glaciares Artesonraju, Yanamarey, Uruashraju y Shallap en el año hidrológico (septiembre–agosto). Monitoreados por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua.

Procedimientos empleados

Tratamientos y procesamiento de la serie de imágenes satelitales

El ámbito fue cubierto por 50 escenas entre los sensores TM y ETM+ de los satélites Landsat 5 y 7 (Path 8 y Row 66) para la parte norte y 41 escenas también entre los sensores TM y ETM+ (Path 8 y Row 67) para la parte sur. Las imágenes tuvieron un nivel de procesamiento de corrección geométrica en el sistema de coordenadas UTM y *datum* WGS84.

Digitalización de las SLA de los glaciares con monitoreo de campo

Los glaciares son grandes masas de hielo, con o sin agua intersticial, de límites bien establecidos, originados sobre la tierra por metamorfismo a hielo de acumulaciones de nieve, y que fluyen lentamente (Marangunic, 2007). La digitalización se realizó sobre un corredor central de aproximadamente 400 m de ancho, utilizando una combinación de bandas "5-4-2" y en algunos casos se complementó mediante la combinación "4-3-2" (Figura 2). A estas combinaciones se aplicó el realce de desviación estándar en 1 y 2 grados, de tal manera que visualmente se pueda diferenciar entre la cobertura de hielo y de nieve. Complementariamente sobre la combinación de bandas "5-4-2" se aplicaron otros realces de ecualización y de mínimos y máximos. Realizada manualmente la digitalización de la SLA sobre las imágenes satelitales, se procedió a la obtención del valor promedio de la altitud de la SLA extraída del modelo de elevación digital. La digitalización y obtención de valores de SLA se hizo para todas las imágenes satelitales (periodo 2001-2010.) y sobre los corredores realizados para cada uno de los glaciares (Artesonraju, Uruashraju, Yanamarey y Shallap).

Preparación de datos de la ELA de los glaciares con monitoreo de campo

Se revisó y estandarizó la información de balances de masa y valores de ELA para los cuatro glaciares monitoreados dentro del ámbito de la Cordillera Blanca (Figura 3). Estos datos corresponden a los años hidrológicos 2001-2002 y 2009-2010. Francou y Pouyaud (2004) sostienen que el balance de masa representa el equivalente de agua de lo que gana o de lo que pierde un glaciar en un tiempo determinado.

Relación estadística entre la SLA y la ELA de los glaciares con monitoreo de campo

Se aplicaron relaciones estadísticas entre las SLA digitalizadas sobre las imágenes para los cuatro glaciares de la Cordillera Blanca que poseen datos de campo y los valores de ELA obtenidos de los balances de masa por el método glaciológico. La fecha óptima para la digitalización de la SLA para cada año (Tabla 1) se seleccionó cuando la diferencia de valor entre SLA y ELA fuera lo menor posible y además contenga una buena relación estadística en conjunto. La comparación estadística se realizó mediante una regresión lineal entre ambos valores y el grado de correlación se obtuvo del coeficiente de determinación (Para el Glaciar Artesonraju, ver Rabatel et al., 2012.). Al obtener buenos resultados de las comparaciones estadísticas de regresión lineal entre la SLA y ELA se puede realizar la digitalización de la SLA sobre otros glaciares en las fechas seleccionadas.

Determinación de la SLA sobre otros glaciares de la Cordillera Blanca

La digitalización de la SLA fue ampliada al grupo de glaciares escogidos de acuerdo a sus características morfotopográficas. La digitalización y obtención de valores de SLA del grupo de glaciares seleccionados

Tabla 1. Fechas de imágenes propicias para la digitalización de las SLA

Fechas	30/06/2001	17/06/2002	22/07/2003	07/08/2003	13/05/2004	24/05/2005	11/07/2005	06/07/2006	31/08/2006	01/07/2007	17/07/2007	03/07/2008	19/07/2008	28/06/2009	30/07/2009	25/07/2010	26/08/2010
Zona Norte (Path 8/ row 66)	x	x	x		x	x	x	x		x			x	x			x
Zona Sur (Path 8/ row 67)	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	

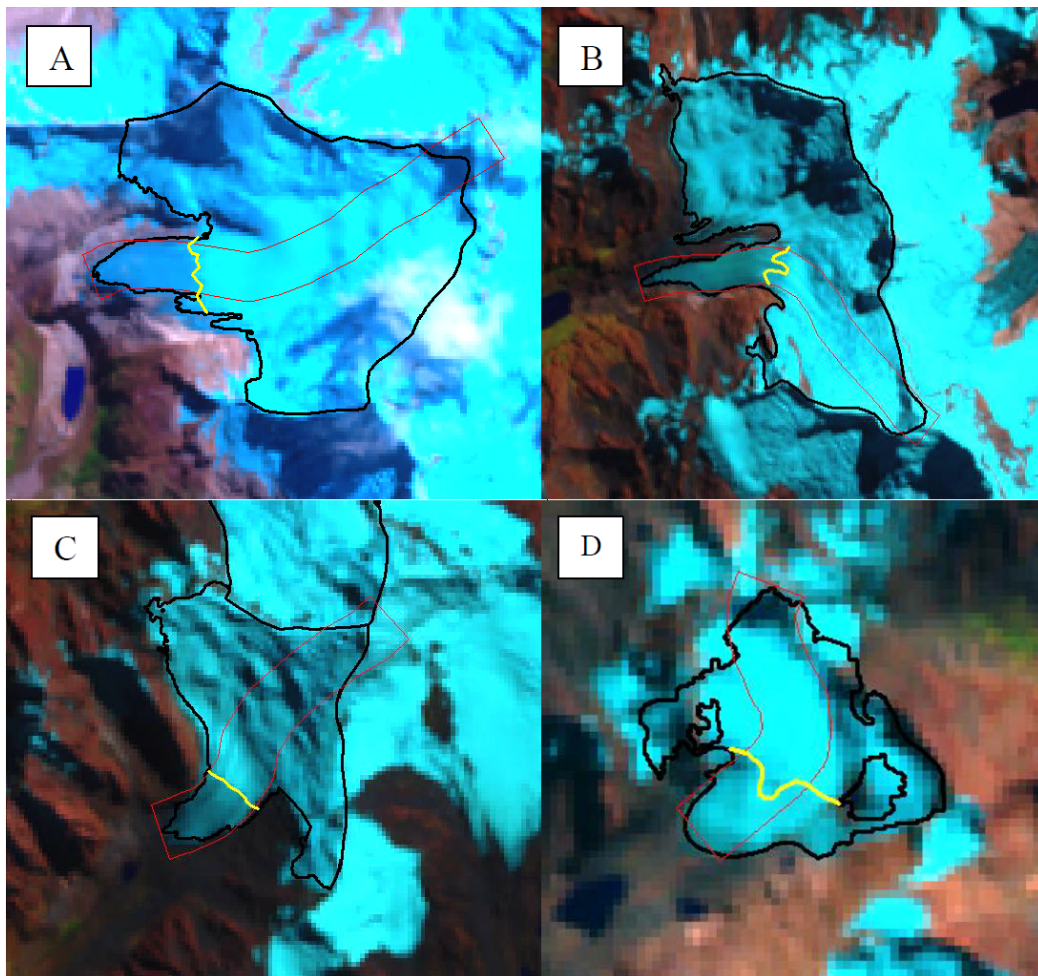


Fig. 2. Digitalización de la SLA glaciario Artesonraju (A), Shallap (B), Uruashraju (C) y Yanamarey (D). En color amarillo se muestra la posición de la SLA, en color negro el borde glaciario y en color rojo los corredores para la medición de la SLA

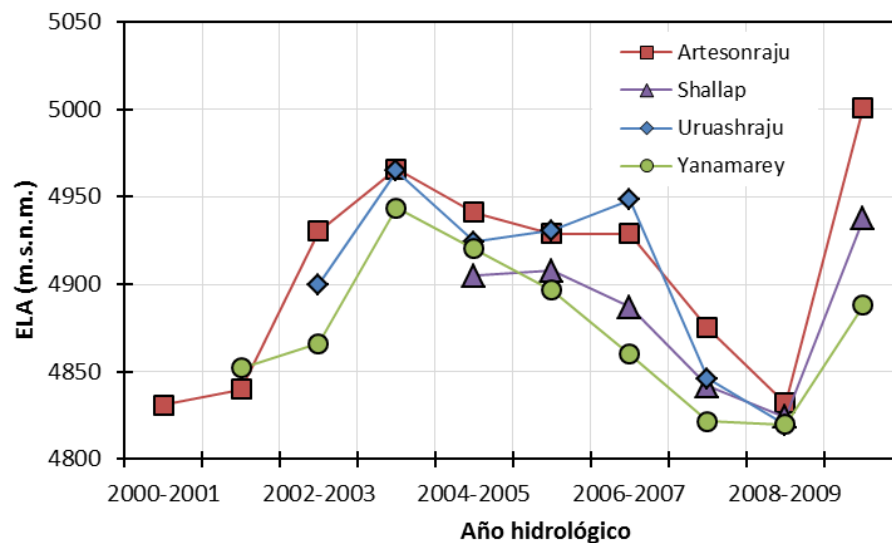


Fig. 3. Valores de ELA de los 4 glaciarios monitoreados en la Cordillera Blanca

no fue continua sobre todos los años del periodo de análisis (2000–2010), debido a que las imágenes seleccionadas en algunos casos contenían nubosidad o sin información. El problema de la falta de información sobre algunas escenas se observó sobre el sensor ETM+ (Landsat 7), que a partir del 31 de mayo del 2003 tiene un problema con el escáner "SLC" (NASA, 2011); por lo tanto las tomas a partir de esa fecha no son completas, muestra líneas sin información. Para completar la información de SLA en algunos casos donde no se pudo realizar su medición con las imágenes (13 casos para un total de 170) se usó el método bilineal, que permite completar series temporales utilizando los promedios de cada uno de los glaciares y de cada uno de los años (Lliboutry, 1974).

Análisis de las series de SLA y comparaciones con parámetros climáticos y morfotopográficos

Se analizó los valores de la SLA obtenidos de los 17 glaciares muestra tratados en el periodo 2001–2010 para caracterizar su variabilidad espacio–temporal. Los parámetros climáticos utilizados para la comparación con los valores de SLA fueron:

- Temperatura de reanálisis ERA–Interim a nivel superficial,
- Temperatura de reanálisis ERA–Interim a 2 m,
- Temperatura de reanálisis NCEP/NCAR a 700 mbar,
- Anomalías de la temperatura superficial del mar (SST, por su sigla en inglés) para la zona Niño 1+2,
- Anomalías de la temperatura superficial del mar para la zona Niño 3, Anomalías de la temperatura superficial del mar para la zona Niño 4,
- Anomalías de la temperatura superficial del mar para la zona Niño 3.4.

Los datos mensuales de temperaturas de reanálisis se obtuvieron del cuadrante -8.5° a -9° en latitud y de -77.5° a -78.5° en longitud, para el periodo 2000–2010. Se trabajaron con los datos de ERA–Interim para la temperatura superficial y temperatura a 2 m; y los datos de NCEP/NCAR R1 para la temperatura a 700 mbar. Para el análisis de comparación estadística se tomaron:

- El promedio de anomalías de septiembre a agosto del siguiente año,
- El promedio móvil de anomalías de septiembre a agosto del siguiente año,
- El promedio de anomalías de noviembre a enero del siguiente año,
- El promedio móvil de anomalías de noviembre a enero del siguiente año.

Uno de los rangos promedios se estimó durante el año hidrológico de septiembre a agosto, similar a los balances de masa anuales de los glaciares. Otro rango promedio de meses empleado fue de noviembre a enero, debido a que en este periodo se presentan las anomalías más marcadas del año.

Los datos de anomalías de temperaturas de la superficie del mar se procesaron de las áreas Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4.

Los parámetros morfotopográficos utilizados para la comparación con los valores de SLA fueron:

- Orientación del glaciar a nivel de su corredor central definido para la obtención de la SLA,
- Área superficial del glaciar (UGRH, 2010),
- Longitud del glaciar en su punto central (UGRH, 2010),
- Latitud de glaciar en su punto central (UGRH, 2010),
- Altitud media del glaciar (UGRH, 2010),
- Pendiente del glaciar al nivel de su corredor central definido para la obtención de la SLA,
- *Sky view* factor (factor de vista del cielo) indica la relación entre el área visible del firmamento y el área al amparo de la topografía (Souza, 2003; Zakšek et al., 2011).

Las comparaciones entre los parámetros glaciológicos, morfotopográficos y climáticos se hicieron mediante la relación estadística lineal simple y múltiple, para ver la variación de la desviación estándar con cada uno de los parámetros y con la combinación de dos o más parámetros.

RESULTADOS

Comparación de la SLA (teledetección) y la ELA (monitoreo en campo)

Las comparaciones de las SLA obtenidas mediante técnicas de teledetección y las ELA obtenidas con datos de campo de los glaciares muestran, Figura 4, que los coeficientes de determinación fueron superiores a 0.8.

Esta comparación entre las SLA y las ELA para los glaciares estudiados con mediciones de campo permite confirmar que la SLA constituye un indicador confiable de la ELA (Rabatel et al., 2005, 2008, 2012). En la Tabla 2 se muestran los valores de SLA, obtenidos de las imágenes satelitales entre el periodo 2001 y 2010, promedios y la desviación estándar para los 17 glaciares dentro de la Cordillera Blanca, los valores de SLA (color azul y subrayado) son aquellos que fueron completados estadísticamente por el método bilineal.

La evolución temporal durante el periodo 2001–2010 se muestra en la Figura 5. La línea de color negro representa el promedio anual de SLA de todos los glaciares analizados. La dispersión de los puntos entre los valores máximos y mínimos se encuentra entre las cotas de 4690 y 5260. Sobre todo el periodo de estudio, el valor más bajo de SLA es el correspondiente al glaciar de código: 4989946–6 en el año 2002 y el valor más alto es del glaciar de código: 1376938–1 en el año 2010. Además, en el periodo de estudio, se observa una variabilidad interanual importante de 75 m. Considerando cada año de manera independiente, se puede notar que la SLA varía de un glaciar a otro entre 50 y 100 metros.

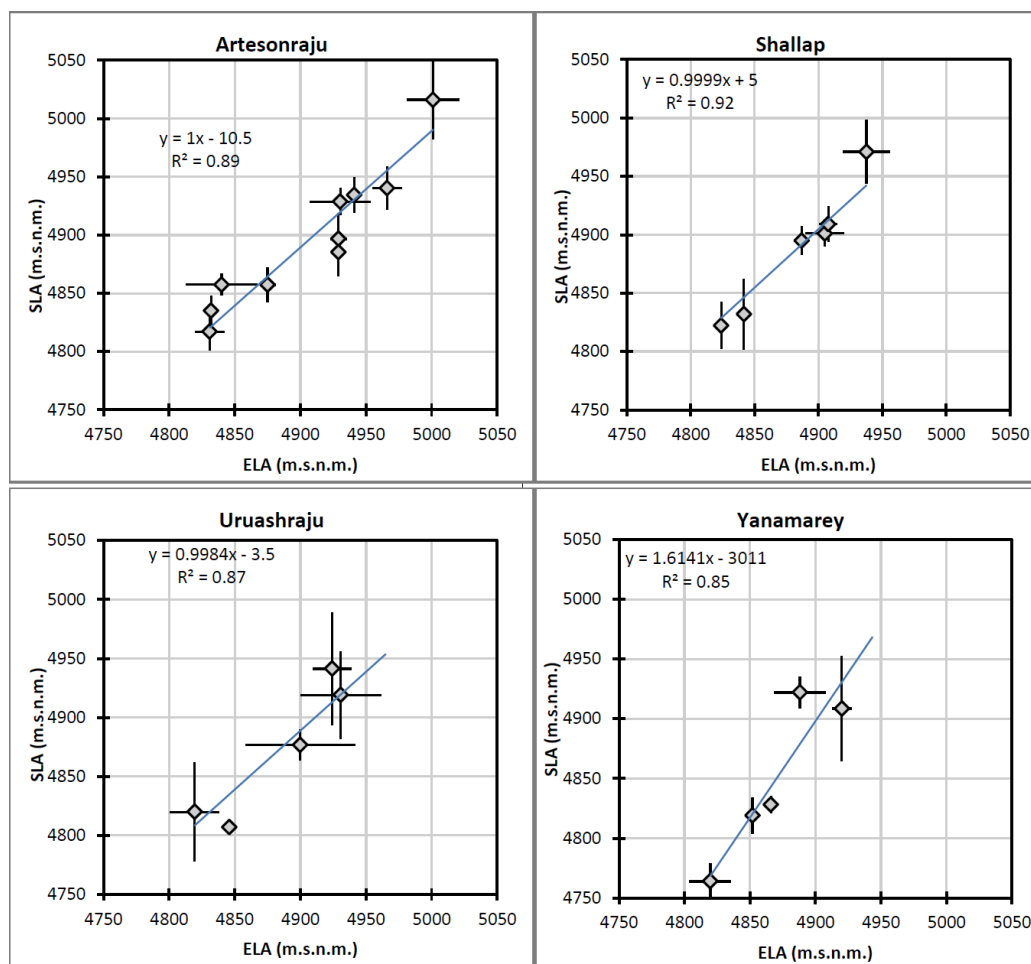


Fig. 4. Comparativa entre la SLA (calculado mediante imágenes de satélite) y la ELA (calculado mediante mediciones de terreno)

ALTURA DE LA LÍNEA DE EQUILIBRIO EN LA CORDILLERA BLANCA

Tabla 2. SLA de los 17 glaciares muestra, en color azul y subrayado los completados estadísticamente

Glaciares	Año										Promedio
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
<i>Artesonraju</i>	4817	4857	4929	4940	4934	4897	4885	4857	4835	5016	4897
<i>Shallap</i>	4771	4894	4890	4924	4901	4909	4895	4832	4822	4971	4881
<i>Uruashraju</i>	4785	4864	4877	4933	4941	4919	4891	4802	4820	5029	4886
<i>1376938-1</i>	4934	4927	4974	5010	4974	4944	4974	4908	4905	5257	4981
<i>4989946-6</i>	4778	4694	<u>4880</u>	4922	4967	4962	<u>4876</u>	4888	4813	4977	4876
<i>4989949-39</i>	4840	4935	<u>4985</u>	4966	5123	5076	4956	4931	4924	5100	4983
<i>Ashnocuana</i>	4859	4869	<u>4912</u>	4913	4971	4882	<u>4908</u>	4899	4870	4967	4905
<i>Champará</i>	4752	4748	<u>4827</u>	4857	<u>4900</u>	4798	<u>4823</u>	4765	4792	4951	4821
<i>Copap</i>	4720	4826	<u>4945</u>	5100	5157	4902	4983	5061	4750	5133	4958
<i>Huaytapallana</i>	4756	4793	4848	4985	5025	5029	5022	4857	4831	5033	4918
<i>Huillca</i>	4862	4886	<u>4912</u>	4900	4998	4895	4930	4873	4836	5005	4910
<i>Llaca 1</i>	4931	4935	<u>4937</u>	5000	4933	4929	4939	4931	4935	5113	4958
<i>Millishraju</i>	4740	4849	<u>4879</u>	4911	5016	4909	4949	4839	4788	4997	4888
<i>Pacliash</i>	4897	4868	<u>4969</u>	5019	5179	4942	4945	4941	4905	5087	4975
<i>Pucaranra</i>	4779	4806	<u>4899</u>	4860	4929	4834	4865	4833	4814	5245	4886
<i>Rajupaquinan</i>	4874	4919	4943	4943	4976	4934	4940	4908	4876	5051	4936
<i>Raymondi 1</i>	4779	4858	5083	5024	5078	4962	4863	4767	4828	5184	4943
Promedio	4820	4858	4927	4960	5001	4925	4924	4878	4847	5078	4922
Desviación estándar	69	74	74	85	104	74	62	82	57	98	

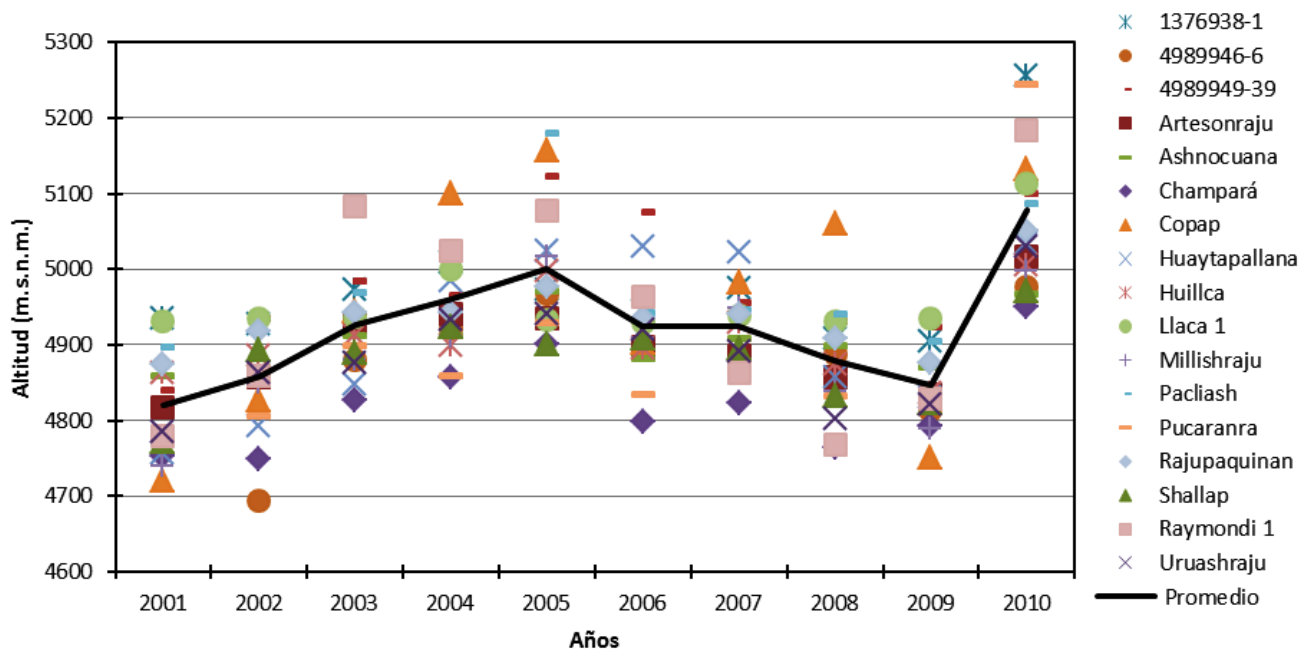


Fig. 5. Valores de SLA de los 17 glaciares analizados y su respectivo promedio anual

Durante los cinco primeros años del periodo de estudio (2001–2005) el aumento progresivo de la SLA alcanza casi 200 metros en promedio, en los glaciares estudiados. Mientras que durante el periodo 2005–2009 la SLA va disminuyendo (poco menos de 150 m en promedio). Finalmente, el año 2010 se caracteriza por una SLA mucho más alta que todos los años anteriores, con un promedio elevado de más de 150 m en comparación al promedio global de todo el periodo. La tasa promedio de ascenso de la SLA durante el periodo de estudio (2001-2010) es de unos 10 m por año.

La SLA y su relación con los factores y eventos climáticos

Los R^2 resultantes del análisis comparativo entre los valores promedios anuales de SLA y las temperaturas de reanálisis muestran coeficientes de determinación de 0.66 a 0.71 (Tabla 3). El mejor coeficiente de determinación se obtuvo con la temperatura a 700 mbar. Estos resultados muestran que hay una influencia significativa de las temperaturas a nivel superficial, a 2 metros y a 700 mbar respecto a la variación de la SLA.

Los coeficientes de determinación obtenidos de la relación estadística entre la SLA y las SST muestran valores inferiores comparados con los valores de las temperaturas de reanálisis (Tabla 4). Los valores sobresalientes los encontramos sobre la zona Niño 3.4, seguido de la zona Niño 4. En el análisis para el año hidrológico, el valor más alto de R^2 es de 0.49 correspondiente a la zona Niño 3.4, y en el análisis para los meses de noviembre a enero (meses de precipitación) se consiguió valores de R^2 de 0.63 (Niño 4) y 0.61 (Niño 3.4).

De los datos climáticos correlacionados, la temperatura de reanálisis a 700 mbar presenta mayor correlación. La Figura 6 muestra que gráficamente se puede deducir que un incremento de la temperatura de la atmósfera de 1 °C a 700 mbar provocaría el ascenso de la SLA promedio de los glaciares de la Cordillera Blanca en 156 m aproximadamente. El incremento de temperatura como efecto del cambio climático sería uno de los factores que está provocando el ascenso de la ELA (SLA) de los glaciares, trayendo como consecuencia la reducción de masa glaciar y la extinción de algunos glaciares.

Tabla 3. Valores de coeficiente de determinación entre SLA y temperaturas de reanálisis

Anomalía (T° 2m)	Anomalía (T° superficial)	Anomalía (T° 700mb)
0.66	0.66	0.71

Tabla 4. Valores de coeficiente de determinación entre SLA y las SST

		Anomalía (NIÑO 1+2)	Anomalía (NIÑO 3)	Anomalía (NIÑO 4)	Anomalía (NIÑO 3.4)
Septiembre–Agosto (Año hidrológico)	Promedio	0.04	0.37	0.39	0.45
	Promedio móvil	0.12	0.44	0.41	0.49
Noviembre–Enero	Promedio	0.3	0.39	0.63	0.56
	Promedio móvil	0.08	0.45	0.56	0.61

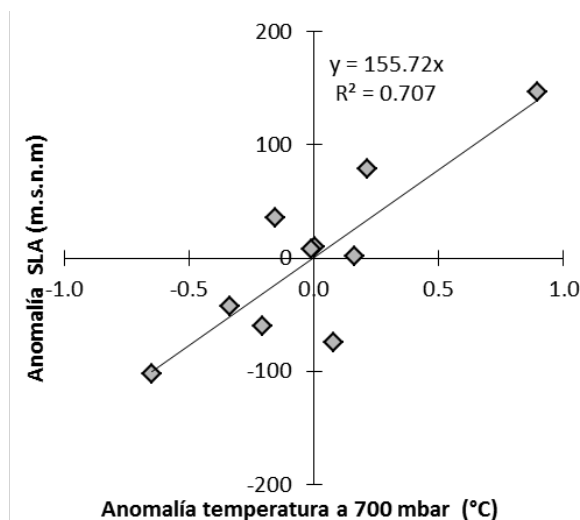


Fig. 6. Relación estadística de la SLA y la temperatura a 700 mbar

La SLA y su relación con los factores morfotopográficos

Los R^2 de los valores promedio de la SLA para cada glaciar y los parámetros morfotopográficos (listados en la Tabla 5) presentaron valores muy bajos; el valor más alto se obtuvo con la mediana de la altitud del glaciar. No se encontró ninguna correlación con la mediana de la pendiente.

En el análisis de los parámetros morfotopográficos se aplicaron correlaciones múltiples de 2, 3 y 4 variables y se seleccionó las variables con mayor coeficiente de determinación: Mediana de la altitud, orientación, SVF (Sky View Factor) y latitud. Los resultados de estas comparaciones fueron mejorando a medida que se agregaba más variables.

En la correlación múltiple con la mediana de la altitud y orientación se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.58 (Tabla 6). La correlación múltiple con las variables de mediana de la altitud, orientación y SVF, dieron un coeficiente de determinación de 0.62 (Tabla 7). En la correlación múltiple con las variables de mediana de la altitud, orientación, SVF y latitud se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.66 (Tabla 8).

En la correlación múltiple al agregar más variables los valores de coeficiente de determinación se incrementan, pero estos incrementos disminuyen a medida que se agregan variables. Los parámetros morfotopográficos individualmente poseen muy baja correlación con la variación de la SLA, pero al correlacionarlos con la mediana de la altitud, orientación, SVF y latitud se incrementan, logrando un coeficiente de determinación alto y significativo.

Considerando las 4 variables, podemos establecer la ecuación que permite estimar la altitud promedio de la SLA, periodo 2001–2010 de cualquier glaciar de la Cordillera Blanca, conociendo sus parámetros morfotopográficos, ecuación (3) (Tabla 8).

Al ser constantes las variables de orientación, factor de vista del cielo y la latitud, solo podría variar la mediana de la altura del glaciar; en base a estas condiciones de la ecuación (1), se deduce que un incremento de 10 m de la mediana de la altura de los glaciares provocaría 1.3 m de ascenso de la SLA.

Tabla 5. Valores de coeficiente de determinación entre SLA y los parámetros morfo-topográficos

Mediana de la pendiente (%)	Longitud	Superficie glaciar 2003 (km^2)	Latitud	Sky view factor	Moda de la orientación	Mediana de la Altitud (ms.n.m)
0.00	0.04	0.09	0.12	0.26	0.29	0.38

Tabla 6. Datos de la correlación múltiple de 2 variables. Orien: orientación, Alti: mediana de la altura del glaciar, R^2 : coeficiente de determinación y RMSE: error medio cuadrático

Ecuación	R^2	RMSE (m)
$SLA_{(2000-2010)} = -0.20 * Orien + 0.16 * Alti + 4130.95....(1)$	0.58	27.00

Tabla 7. Datos de la correlación múltiple de 3 variables. SVF: factor de vista del cielo, Orien: orientación, Alti: mediana de la altura del glaciar, R^2 : coeficiente de determinación y RMSE: error medio cuadrático

Ecuación	R^2	RMSE (m)
$SLA_{(2000-2010)} = -0.08 * SVF - 0.18 * Orien + 0.14 * Alti + 4264.72....(2)$	0.62	25.69

Tabla 8. Datos de la correlación múltiple de 4 variables. Lat: latitud, SVF: factor de vista del cielo, Orien: orientación, Alti: mediana de la altura del glaciar, R^2 : coeficiente de determinación y RMSE: error medio cuadrático

Ecuación	R^2	RMSE (m)
$SLA_{(2000-2010)} = -36.87 * Lat - 0.07 * SVF - 0.17 * Orien + 0.13 * Alti + 3947.77....(3)$	0.62	25.69

CONCLUSIONES

De la determinación de los valores de SLA para los 17 glaciares de la Cordillera Blanca se obtuvo un valor promedio de SLA (ELA) de 4918 m s.n.m; los valores máximos y mínimos de la SLA (ELA) se encuentran entre las cotas de 4694 a 5257. El valor más bajo de SLA corresponde al glaciar de código: 4989946–6 en el año 2002 y el valor más alto al glaciar de código: 1376938–1 en el año 2010. La variación espacio–temporal de las ELA reconstruidas a través de la SLA en la Cordillera Blanca se presenta de manera fluctuante entre un año y otro, con ascensos y descensos de la ELA promedio, pero con una tendencia de ascenso; lo que se traduce por una reducción de masa del glaciar; esta reducción expresada en metros de ascenso de la ELA entre el periodo 2001–2010 es de 110 m aproximadamente.

Las correlaciones estadísticas de la SLA y ELA de los 4 glaciares son muy buenas. El Glaciar Artesonraju presenta un R^2 de 0.89; el Glaciar Shallap, un R^2 de 0.92; el Glaciar Uruashraju, un R^2 de 0.87 y el Glaciar Yanamarey, un R^2 de 0.85. Esto significa que la SLA puede considerarse como un indicador confiable de la ELA, cuando la SLA se mide sobre imágenes satelitales registradas en la estación seca y sin influencia de caídas de nieve, recientes.

La correlación de la SLA y las temperaturas de reanálisis muestran un R^2 de 0.66 para la temperatura a nivel superficial, un R^2 de 0.6 para la temperatura a 2 m y un R^2 de 0.71 para la temperatura a 700 mbar. Un incremento de temperatura de la atmósfera de 1 °C a 700 mbar provocaría el ascenso de la SLA promedio de los glaciares de la Cordillera Blanca en 156 m aproximadamente. Los sectores Niño 3.4 y Niño 4 muestran mejor correlación con los valores de SLA respecto a los otros sectores del Pacífico, aunque el sector Niño 3.4 presenta mejor correlación en los valores de coeficiente de determinación, sin embargo estas correlaciones son menores en comparación de las obtenidas entre la SLA y las temperaturas de reanálisis.

Individualmente, los parámetros morfotopográficos y la SLA poseen muy baja correlación ($0 \leq R^2 \leq 0.38$), aunque al realizar correlaciones múltiples con parámetros morfotopográficos mejora significativamente. Realizando una correlación entre la SLA y 4 variables (mediana de la altitud del glaciar, orientación de glaciar, SVF del glaciar y latitud del glaciar) se pudo establecer una relación estadística que permite calcular la SLA promedio sobre el periodo 2001–2010 de cualquier glaciar de la Cordillera Blanca conociendo sus características morfológicas.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos que brindó al primer autor su apoyo, a la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo y al Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Ambiente (LGGE) en la ciudad de Grenoble, Francia, por el apoyo económico y académico para la realización de la presente investigación

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, J. T. (1975). *Glacial systems: An approach to glaciers and their environments*. North Scituate. Duxbury Press, 191 pp.
- Francou, B. & Pouyaud, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1*, Great Ice, IRD, France, 243 pp.
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1): 93–103.
- Lliboutry, L. (1974). Multivariate statistical analysis of glacier annual balances. *Journal of Glaciology*, 13(69): 371–392.
- Marangunic, C. (2007). *Recomendaciones para la Formación de la Unidad de Nieves y Glaciares. Informe N°143*. Chile, Santiago, 199 pp.
- National Aeronautics and Space Administration–NASA. (2011). *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/>.
- Paterson, W. (1994). *The physics of glaciers*, Pergamon Press, Oxford, 3rd edition.

- Rabatel, A., Dedieu, J.-P., & Vincent, C. (2005). Using remote sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass balance time series: validation on the three french glaciers, 1994–2002. *Journal of glaciology*, 51(175): 539–546.
- Rabatel, A., Dedieu, J.-P., Thibert, E., Leteguilly, A., & Vincent, C. (2008). 25 years (1981–2005) of equilibrium-line altitude and mass balance reconstruction on the Glacier Blanc, French Alps, using remote-sensing methods and meteorological data. *Journal of glaciology*, 54(185): 307–314.
- Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C. & Sicart, J.-E. (2012). Can the snowline be considered as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? *Journal of Glaciology*, 58(212): 1027–1036.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Caceres, B., Ceballos, J.L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Ménégos, M., Mendoza, J., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M. & P. Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1): 81–102. doi: 10.5194/tc-7-81-2013.
- Souza, L.C.L., Rodrigues, D. S. & Mendes, J. F.G. (2003). Sky View Factors Estimation Using A 3d-Gis, Extension Eighth International IBPSA. Conference, 1227–1234.
- Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (2010). Inventario de glaciares Cordillera Blanca. Perú, 81pp.
- Zakšek, K., Oštir, K. & Kokalj, Z. (2011). Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3: 398–415. doi: 10.3390/rs3020398.
- Zamora, M. (1983). Inventario y Seguridad de Lagunas en la Cordillera Blanca. ELECTROPERU. Glaciología y Seguridad de Lagunas. Perú.
- Zapata, M. (2002). La dinámica glaciár en lagunas de la Cordillera Blanca. *Acta Montana, Serie A, Geodynamica*, 19 (123): 37–60.