

# Glacial coverage of the snow-capped mountains of the Catac district, Ancash and its relationship with precipitation and temperature during the period 1988-2022

Chuquilín-Goicochea, Roberto, Dr.<sup>1</sup>, Palacios-Miñano, Alberto, Mg.<sup>3</sup>, Domínguez-Marchena, Rosnell, Ing.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [roberto.chuquilin@upn.edu.pe](mailto:roberto.chuquilin@upn.edu.pe), [alberto.palacios@upn.edu.pe](mailto:alberto.palacios@upn.edu.pe), [rosnell.domin@gmail.com](mailto:rosnell.domin@gmail.com)

*Abstract*—The objective of this research was to analyze how precipitation and temperature affect changes in the glacial coverage of the snow-capped mountains of the Catac district during the period from 1988 to 2022. An applied study was carried out with an explanatory level and a longitudinal design. non-experimental, since the period from 1988 to 2022 was temporally analyzed. The remote sensing technique and the NDSI index (Normalized Differential Snow Index) were used to recognize the glacier, and the climate information was obtained from the PISCO-SENAMHI grid product. A decrease in glacier coverage was observed at a rate of 0.73 km<sup>2</sup> per year. The statistical correlation analysis revealed that temperature is the only factor that significantly influences changes in glacier cover, while precipitation is part of the glaciological balance system, but its influence on surface changes is not significant due to a superficial and non-volumetric analysis. In conclusion, the increase in temperature has a notable impact on glacier coverage, through the melting and instability of the ice.

*Keywords*— Remote sensing, satellite images, glacier coverage, precipitation, temperature.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LEIRD).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LEIRD).  
**DO NOT REMOVE**

# Cobertura glaciar de los nevados del distrito de Catac, Ancash y su relación con la precipitación y temperatura durante el periodo 1988-2022

Chuquilín-Goicochea, Roberto, Dr.<sup>1</sup>, Palacios-Miñano, Alberto, Mg.<sup>3</sup>, Domínguez-Marchena, Rosnell, Ing.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte, Perú, [roberto.chuquilin@upn.edu.pe](mailto:roberto.chuquilin@upn.edu.pe), [alberto.palacios@upn.edu.pe](mailto:alberto.palacios@upn.edu.pe), [rosnell.domin@gmail.com](mailto:rosnell.domin@gmail.com)

**Resumen**– *El objetivo de esta investigación fue analizar cómo la precipitación y la temperatura afectan los cambios en la cobertura glaciar de los nevados del distrito de Catac durante el periodo de 1988 a 2022. Se realizó un estudio aplicado con un nivel explicativo y un diseño longitudinal no experimental, ya que se analizó temporalmente el periodo de 1988 a 2022. Para el reconocimiento del glaciar se utilizó la técnica de teledetección y el índice NDSI (Índice de Nieve Diferencial Normalizado), y la información climática se obtuvo del producto grilla PISCO-SENAMHI. Se observó una disminución de la cobertura glaciar a una tasa de 0,73 km<sup>2</sup> por año. El análisis de correlación estadística reveló que la temperatura es el único factor que influye significativamente en los cambios en la cobertura glaciar, mientras que la precipitación forma parte del sistema de balance glaciológico, pero su influencia en los cambios superficiales no es significativa debido a un análisis superficial y no volumétrico. En conclusión, el aumento de la temperatura tiene un impacto notable en la cobertura glaciar, a través del derretimiento y la inestabilidad del hielo.*

**Palabras clave**– *Teledetección, imágenes satelitales, cobertura glaciar, precipitación, temperatura.*

## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, hay más de 200 000 glaciares aproximadamente que se encuentran con pérdidas de cobertura glaciar en varios lugares del continente, quienes han presentado una disminución considerable de sus masas glaciares [1]. Según la revista Nature los nevados han presentado un ritmo acelerado de retroceso glaciar de 267 gigatoneladas por año, que equivale a un 21 % del total de aumento del nivel del mar, esto debido a la variación de las condiciones climáticas medias, actividades humanas y meteorización ocurridas durante los últimos 19 años [2]. Asimismo, las zonas más afectadas son los polos quienes han presentado temperaturas altas en los últimos años, un claro ejemplo de lo que se menciona es China, que en solo 4 décadas tuvo una disminución de un 20 % en masa glaciar [3]. En consecuencia, la pérdida de cobertura glaciar provoca estrés hídrico en épocas de sequía, aumento del nivel del mar, avalanchas, huaicos y olas de calor en los diferentes lugares suscitados [4].

Por otro lado, el cambio climático ha sido un problema que ha afectado de manera directa en la presentación de estas variaciones en las coberturas glaciares [5]. Por consiguiente, se registra el incremento de la temperatura, la reducción de lluvias y el aumento del isoterma [6], esto conlleva al deshielo de los glaciares andinos en su mayoría, reduciendo la masa glaciar de

cada una de ellas y la vulnerabilidad hídrica [6]. Asimismo, este evento se registró en México con la desaparición por completo del glaciar el Ayaloco en el año 2018 [5].

Los glaciares tropicales son una de las principales reservas de agua dulce, estos se ubican en la cordillera de los Andes, donde Perú presenta un 71% de estos [7], sin embargo, estos son muy sensibles a los cambios agresivos que se están dando producto del cambio climático, en los últimos 50 años se ha reducido un 51% de la cobertura glaciar en los nevados del Perú [8]. Por otra parte, estos cambios agresivos son producto de las variaciones de la temperatura que en la última década aumentó drásticamente, además la precipitación disminuyó en estos lugares presentando anomalías de estas variables [9].

El retroceso glaciar en la cordillera de los andes peruanos pone de manifiesto esta estrecha relación con la variación de temperatura en estas últimas décadas, sobre todo en el departamento de Áncash, donde se encuentran los nevados más famosos por su atractivo turístico, se han realizado análisis multitemporal usando imágenes satelitales Landsat y GIS, como en la microcuenca de Llanganuco (1987 – 2007) [10], en nevados Allin Capac y Chichi Capac (1975 – 2015) [11], en la Cordillera Blanca (2004 – 2014) [12]. Se encontraron tasas de cambio de -0,73 km<sup>2</sup>/año [10], -0,89 km<sup>2</sup>/año [11] y -3,1 km<sup>2</sup>/año [12], respectivamente. Esto demuestra que el escenario futuro del retroceso glaciar será crítico, hasta el punto en que algunos glaciares desaparecerían. Asimismo, se estudió el retroceso glaciar del nevado del Huaytapallana, que es la principal fuente de agua del valle del Mantaro, en el departamento de Junín. Se utilizaron el método directo con pozos y balizas, métodos topográficos de terreno, métodos de restitución aerofotogramétrica y método indirecto del balance hidrológico en los diversos puntos del glaciar. Se realizaron estudios los años 1970 – 2006 [13] y 1986 – 2016 [14], y se encontró una variación de temperatura promedio de 4,757 °C/año. Al sur de los andes peruanos se realizó una prospección entre los años 1985 – 2010, y se encontró una tasa de cambio de -0,978 km<sup>2</sup>/año en el Nevado Ananea, departamento de Puno [15]. Es importante realizar este tipo de estudios en los glaciares puesto que los efectos de la temperatura y el cambio climático es diverso a diferentes latitudes. Por ejemplo, en Ecuador y Colombia, los estudios en el nevado Cayambe [16] y volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Santa Isabel [17], respectivamente; han demostrado que mientras más cercanos a la línea ecuatorial, es más pronunciado el retroceso glaciar, 24 a 60% de pérdida de superficie glaciar en lapso de 5 años de estudio.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).

DO NOT REMOVE

El objetivo de este artículo fue determinar la variabilidad de la cobertura glaciar de los nevados del distrito de Catac y su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1988 – 2022, Ancash.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

Los nevados en estudio se localizan en el distrito de Catac; geográficamente se encuentra entre las coordenadas UTM (WGS84 Zona L-18 Sur): m Este 235466; m-Norte 8907665 y m-Este 261818; m-Norte 8903458. Presentan una superficie aproximada de 216,85 km<sup>2</sup>.

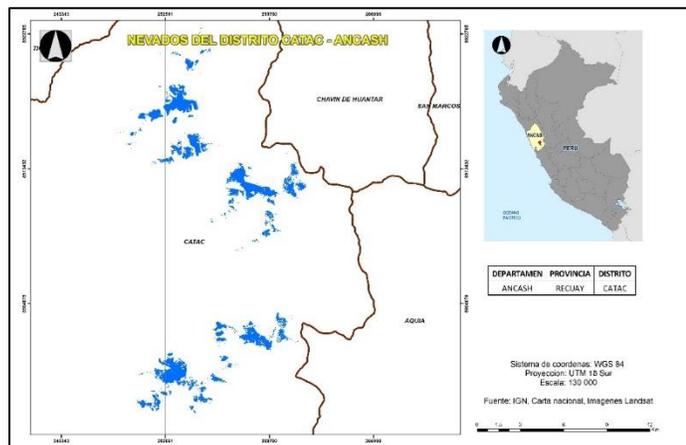


Fig. 1 Mapa de localización del distrito Catac.  
Nota. Mapa cartográfico elaborado en ArcGIS 10.5.

### Recolección de datos

Se recolectó datos respecto a la precipitación y temperatura en los nevados del distrito de Catac entre el periodo de 1988 – 2022, se hizo el uso de dos métodos. Se usó imágenes satélites Landsat 5, 6 y 7 y el método de geoprocresamiento espacial.

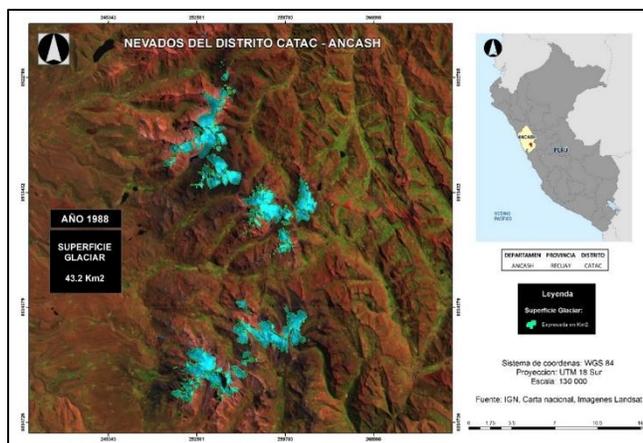


Fig. 2 Zonificación del área de estudio.  
Nota. Mapa cartográfico elaborado en ArcGIS 10.5.

La información meteorológica se obtuvo de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [18], y se plasmó en una hoja de cálculo MS Excel 2016, para obtener el promedio anual en unidades mm/año. Se realizó la zonificación del área de estudio para 6 nevados, de la subcuenca Pachacoto, seleccionados con la imagen Landsat 5 y 8 (Fig. 2).

### Descarga de imágenes

Se realizó la descarga de imágenes satelitales del portal USGS Global Visualization Viewer para el periodo de estudio de 1988 – 2022, haciendo uso de los sensores Landsat 5 TM, 7 ETM y 8 MT, de acceso gratuito (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (Tabla I). La descarga de imágenes se consideró en la época seco (mayo – setiembre), debido a la baja nubosidad (0 a 2%), que facilita la medición. La resolución espacial de 30 m, el rango de colección fue 2 nivel 2, esto significa que las imágenes poseen corrección atmosférica a nivel de superficie [19]. Esta ventaja permitió restringir proceso de corrección atmosférica mediante software ENVI y QGIS. En la Tabla I, se muestran las características de las misiones Landsat 5 y 8, no se consideró la misión Landsat 7 por el error digital con vacíos de 15 % que posee [20].

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS DE LAS MISIONES LANDSAT 5 TM Y LANDSAT 8 OLI

Sensor	Landsat 5 TM		Landsat 8 OLI-TIRS		
Resolución Espectral	7 bandas		11 bandas		
	1 a 5 y 7	6	1 a 7 y 9	8	10 y 11
Resolución Espacial	30 m	120 m	30 m	15 m	120 m
Resolución temporal	16 días		16 días		
Resolución Radiométrica	8 bits		16 bits		

TABLA II  
IMÁGENES LANDSAT OBTENIDAS PARA EL ESTUDIO POR CADA PERIODO

Año	Satélite LANDSAT	Fecha de obtención de imagen	Path/Row
1988	5 TM	17/05/1988	008/067
1992	5 TM	12/05/1992	008/067
1996	5 TM	8/05/1996	008/067
2000	5 TM	27/06/2000	008/067
2004	5 TM	8/07/2004	008/067
2008	5 TM	19/07/2008	008/067
2012	7 TM	12/05/2012	008/067
2016	8 TM	22/05/2016	008/067
2020	8 TM	12/07/2020	008/067
2022	8 TM	30/05/2022	008/067

Nota. Porcentaje de nubosidad del 0 a 2%.

En la Tabla II, se muestran las escenas consideradas para este estudio.

### Tratamiento de imágenes Landsat

Las imágenes Landsat son corregidas a nivel de superficies. Por tanto, solo requiere la reproyección de hemisferio norte a sur, con la herramienta Project del programa ArcGIS Desktop. Para el tratamiento de imágenes satelitales se usó el programa ENVI para la corrección radiométrica, geométrica y atmosférica, mediante la rectificación de las bandas, para mejorar la visualización y determinar el porcentaje de la cobertura glaciar de la subcuenca Pachacoto en un periodo de tiempo de 32 años (1988-2016).

### Determinación de la cubierta glaciar

Para la cuantificación de la cobertura glaciar, se consideró el índice NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), el cual permite identificar la superficie glaciar en un territorio [21]. El cálculo viene dado por la siguiente expresión:  $NDSI = \frac{(Banda\ Green) - (Banda\ Swir)}{(Banda\ Green) + (Banda\ Swir)}$ , la banda Green es la que se encuentra en el rango visible y la banda Swir se localiza en el rango de infrarrojo.

Asimismo, para el reconocimiento territorial mediante una percepción de falso color, se consideró la aplicación de la combinación de banda 7-5-3 para Landsat 8 y la combinación 7-4-2 para Landsat 5. Estos dos resultados permitieron identificar con claridad la cobertura glaciar.

### Determinación de la precipitación y temperatura

La información climática fue adquirida de la librería “IRI data Library” [22]. Esto permitió el corrido del script llenado.

### Análisis estadístico

Se analizó el cumplimiento de los supuestos de normalidad (Shapiro – Wilks), homogeneidad de varianzas (Levene) y aquellos datos que cumplieron con estos supuestos se aplicó la prueba de correlación de Pearson, los que no cumplieron se aplicó Spearman.

## III. RESULTADOS

### Variabilidad de la cobertura glaciar

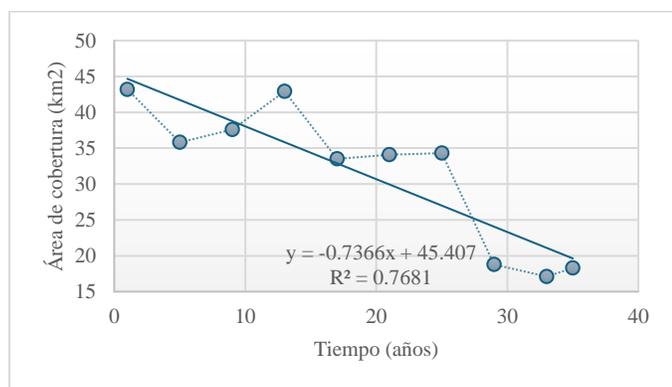


Fig. 3 Variabilidad de la cobertura glaciar (1988-2022).

En la Fig. 3, se observa la variabilidad de la cobertura glaciar durante el periodo 1988-2022, se observa que la proyección lineal va en descenso a un ritmo de 0,7366 km²/año.

En la Fig. 4, se aprecia la variabilidad de la cobertura glaciar de modo cartográfico de la subcuenca Pachacoto. Una disminución del 42,36% en la cobertura glaciar de los nevados en estudios durante el periodo de 1988 a 2022, ha sido observada en el mapa cartográfico (Fig. 4).

Estas zonas son más vulnerables a la fusión debido a que su estado de cristalización no es estable y están mezcladas con detritos [23]. Además, teniendo en cuenta la gradiente térmica altitudinal en la cordillera de los Andes, la temperatura ambiental es mayor en las zonas bajas que en las zonas altas [24].

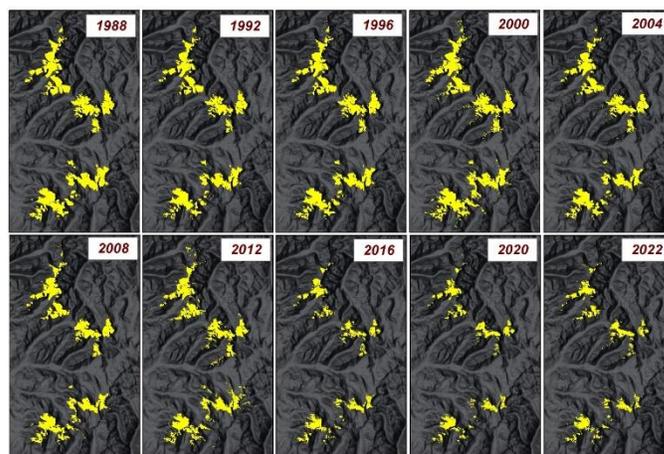


Fig. 4 Mapa de variabilidad de la cobertura glaciar (1988-2022).

### Cambios temporales de los elementos climáticos precipitación y temperatura

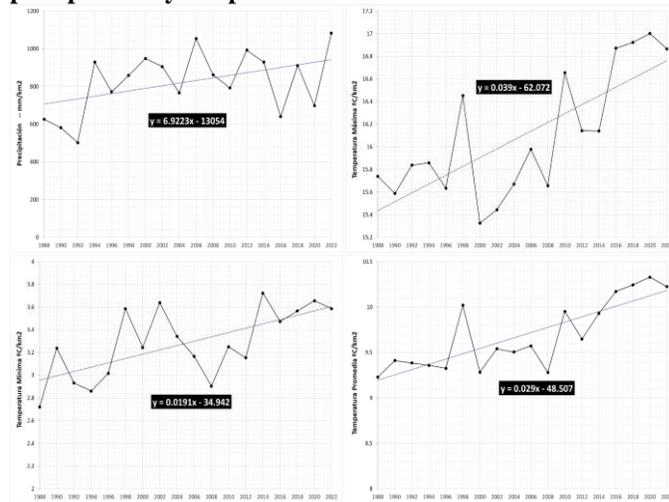


Fig. 5 Cambios temporales de precipitación y temperatura (1988-2022).

La Fig. 5 muestra cómo cambió el nivel de precipitación a lo largo del tiempo de análisis, sin mostrar una tendencia

definida. Mostró una correlación baja y no significativa con la cobertura glaciár ( $r = -0,086$ ;  $p > 0,05$ ) (Tabla III).

La variabilidad de las precipitaciones se debe a múltiples factores, tales como los vientos húmedos provenientes de la costa del Pacífico y la radiación solar, que es más intensa a mayor altitud [25]. Durante el periodo de 1999 a 2019, la radiación solar anual promedio para estos nevados centrales altoandinos fue de 2245 kw-h/m<sup>2</sup> [26]. Esta insolación provoca la evaporación de agua de las lagunas glaciáres y los suelos húmedos [27]. Luego, la evaporación es redistribuida con la precipitación sólida, lo que provoca un ciclo hídrico local. Otros factores son los fenómenos climáticos, como El Niño y La Niña, especialmente en las categorías moderada, fuerte y muy fuerte [28]. Estas anomalías alteran la temperatura ambiental, incrementando la evaporación y la humedad relativa, resultando en un incremento o reducción de las precipitaciones debido al contenido de agua en las nubes [7].

Las precipitaciones en forma sólida, como el granizo, son fundamentales para la formación de la nieve y su posterior cristalización en una estructura más rígida. Sin embargo, debido a la pérdida de cobertura glaciár, estas precipitaciones pueden perderse en las zonas rocosas o meteorizadas, que quedan expuestas, impidiendo la formación de una masa glaciár suficientemente densa [29]. En adición, estas precipitaciones sólidas son esporádicas y se derriten con facilidad debido calor, generado por la radiación solar [30]. Esta situación se observa en los nevados de la subcuenca Pachacoto, donde la cobertura glaciár no es densa a nivel de superficie [31].

TABLA III  
PRUEBA DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Factores climatológicos	Cobertura Glaciár		
	n	Coefficiente r de Pearson	Sig. bilateral
Precipitación	10	-0,086	0,813
Temperatura Mínima	10	-0,833	0,003*
Temperatura Máxima	10	-0,947	0,000*
Temperatura Promedio	10	-0,964	0,000*

\*Significativo a  $\alpha = 0,05$

El comportamiento de la temperatura obedece a una tendencia creciente a través del tiempo (Fig. 5). La temperatura máxima aumentó a razón de 0,039 °C por año, ostentando una correlación negativa muy alta y significativa con la cobertura glaciár ( $r = -0,947$ ;  $p < 0,05$ ) (Tabla III).

Del mismo modo, la temperatura mínima aumentó a razón de 0,019 °C por año (Fig. 5); sin embargo, mostró una correlación negativa alta y significativa con la cobertura glaciár ( $r = -0,833$ ;  $p < 0,05$ ) (Tabla III).

La temperatura promedio también muestra una tasa creciente de 0,029 °C por año, y al igual que la temperatura máxima, mostró una correlación negativa muy alta y

significativa con la cobertura glaciár ( $r = -0,964$ ;  $p < 0,05$ ) (Tabla III).

La cobertura glaciár de los nevados del distrito de Catac está disminuyendo a una tasa alarmante siendo la variabilidad climática el factor principal, pues representa la mayor amenaza para los glaciáres de alta montaña. Se encontró que en los nevados de Pachacoto, la temperatura máxima y mínima ha aumentado provocando un mayor derretimiento de la masa glaciár [32]. Es resaltante que la zona de ablación de los nevados de Pachacoto fluctúan entre 4500 y 5200 m. s. n. m., lo que implica que una propensión a la fusión del hielo en esta área en comparación con las de mayor altitud [33]. En adición, las áreas más propensas a la fusión por lo general se encuentran en altitudes bajas [34,35].

El aumento de la temperatura en los nevados se debe a la radiación directa del sol en las montañas altas, con una magnitud media alta de 5,5 a 6,5 kw-h/m<sup>2</sup>.día [36]. A mayor altitud, la capa atmosférica de protección contra la radiación solar es menor, lo que significa que las montañas altas reciben una mayor radiación solar [37]. En adición, el suelo desnudo y rocoso está aumentando debido a la deglaciación, es un componente calorífico que contribuye al incremento de la temperatura [38].

La temperatura en los andes peruanos se ha incrementado a un ritmo mayor que el promedio mundial en las últimas décadas [39]. La temperatura media en las zonas de alta montaña de los Andes peruanos ha aumentado en 0,7 °C desde 1970 [40].

Al analizar las pruebas de correlación de Pearson (Tabla III), los resultados sugieren que las precipitaciones no están asociadas al cambio en la cobertura glaciár. Es importante destacar que esta investigación solo aborda el parámetro morfométrico superficial de un glaciár, no la parte volumétrica [41]. Por lo tanto, la asociación estadística hallada tiene sentido, pues las precipitaciones son unidades volumétricas, a diferencia del presente análisis estadístico de cambio de la superficie del glaciár [42]. Sin embargo, desde una perspectiva de balance de masa glaciár, las precipitaciones sólidas son un componente clave para la formación de la nieve y el hielo, ya que son la entrada principal para mantener una cobertura glaciár en un ciclo hidrológico de montaña [43,44]. Según información proporcionada por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), el espesor del glaciár en la Cordillera Blanca de Ancash varía entre 2.5 y 8 metros [45].

Por otro lado, se encontró una asociación estadística entre la temperatura y la cobertura glaciár. La temperatura fue el factor climático que más influyó en los cambios en la cobertura glaciár, puesto que el hielo de los glaciáres es altamente sensible a las variaciones de temperatura [46]. Las temperaturas más cálidas aceleran el derretimiento del hielo glaciár, pues no permiten que el hielo se acumule y se conserve [47].

Además, en las zonas de acumulación, el aumento de la temperatura debilita la estructura del hielo glaciár, provocando la ruptura de grandes bloques de hielo que por acción de la gravedad y la pendiente en las zonas glaciáres que oscila entre

35 y 75 grados [48] y producen rápidamente deshielo, por ello en las zonas bajas de la montaña la temperatura es más alta [49]. Esta situación inestabiliza las masas glaciares por la gravedad [50,51].

#### IV. CONCLUSIONES

La cobertura glaciar de los nevados del distrito de Catac durante el periodo de 1988-2022, están descendiendo de forma lineal a una magnitud de 0,73 km<sup>2</sup>/año. La dinámica de la temperatura muestra un incremento durante el periodo de estudio, tanto para temperatura mínima con 0,019 °C/año y la temperatura con ritmo de incremento de 0,039 °C/año. El desarrollo de este proceso da lugar a zonas de riesgo de desastres naturales que podrían tener implicaciones frente a cualquier tipo de uso humano o económico permanente de estos territorios. Por otro lado, debe ser de preocupación mundial el cuidado de estos nevados, que según los pronósticos están a punto de desaparecer.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el patrocinio de la Universidad Privada del Norte por hacer posible esta publicación.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Hugonnet, R. McNabb, E. Berthier, B. Menounos, C. Nuth, L. Girod, D. Farinotti, M. Huss, I. Dussaillant, F. Brun, Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature* 592 (2021) 726–731.
- [2] J.L. Lorenz, K.K.D.A. Rosa, C. Petsch, C. Perondi, F.D. Idalino, J.D. Auger, R. Vieira, J.C. Simões, Short-term glacier area changes, glacier geometry dependence, and regional climatic variations forcing, *King George Island, Antarctica, An Acad Bras Cienc* 95 (2023) e20211627.
- [3] Pueblo en línea, China pierde un 20% de sus glaciares en cuatro décadas, *Diario Del Pueblo* (2019).
- [4] K.S. Johansen, B. Alftan, E. Baker, M. Hespang, T. Schoolmeester, K. Verbist, *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*, UNESCO Publishing, 2019.
- [5] ONU, *Informes sobre cambio climático*, Organización de Las Naciones Unidas (2023).
- [6] M.P. Aedo, T. Montecinos, *Glaciares andinos: recursos hídricos y cambio climático: desafíos para la justicia climática en el Cono Sur*, Programa Chile Sustentable, 2011.
- [7] INAIGEM, *Informe de la situación de los glaciares y ecosistemas de montañas*, Instituto Nacional de Investigación En Glaciares y Ecosistemas de Montaña (2017).
- [8] Autoridad Nacional del Agua, *Inventario nacional de glaciares y lagunas*, Repositorio Digital de Recursos Hídricos (2014).
- [9] R.M. Horton, J.S. Mankin, C. Lesk, E. Coffel, C. Raymond, A review of recent advances in research on extreme heat events, *Curr Clim Change Rep* 2 (2016) 242–259.
- [10] D. Colonia, J. Torres, Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Llanganuco, a través del análisis multitemporal en el periodo 1987-2007, *Proceedings of the 4th GEOBIA* 592 (2012).
- [11] R.D. Díaz Aguilar, S.V. Sanchez Larico, E. Lujano Laura, A. Lujano Laura, Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú, *Revista de Investigaciones Altoandinas* 19 (2017) 265–274.
- [12] A.A. Yap Arévalo, Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GLOFs, (2015).
- [13] J.A. Aliaga, L.A. Cosme, Retroceso glaciar del Nevado Huaytapallana como consecuencia del calentamiento global, *Naturaleza y Sociedad* 1 (2018).
- [14] W. Bulege-Gutiérrez, M. Custodio, Climate change and glacier retreat in the Huaytapallana Mountain Range, Peru, *Tecnología y Ciencias Del Agua* 11 (2020) 229–261.
- [15] B.H.C. Amanqui, Evolución De La Cobertura Glaciar Del Nevado Ananea entre 1985-2010, *Revista Científica Investigación Andina* 14 (2016) 57–67.
- [16] E. Gallegos Castro, C. Brito Chasiluisa, D. Serrano Gine, R. Galarraga Sanchez, Time and spatial changes in nevado Cayambe glacier, Ecuador, using aerial photographs and Landsat imagery, *GEOFOCUS* (2018) 97–113.
- [17] M.F.M. Tobar, J.M.L. Bonilla, S. Sansonov, Determination of glacier retreat at Nevado del Ruiz, Santa Isabel and Tolima volcanoes, Colombia through optical image and Din-SAR, *DYNA: Revista de La Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín* 85 (2018) 329–337.
- [18] SENAMHI, *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú (2024).
- [19] M.E.A. Huayaney, J.F.M. de la Cruz, Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca, *Investigaciones Sociales* 13 (2009) 71–83.
- [20] E. Chuvieco, *Fundamentos de teledetección espacial*, *Estud Geogr* 52 (1991) 371.
- [21] X. Xiao, S. Liang, Assessment of snow cover mapping algorithms from Landsat surface reflectance data and application to automated snowline delineation, *Remote Sens Environ* 307 (2024) 114163.
- [22] S.E. Fick, R.J. Hijmans, WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology* 37 (2017) 4302–4315.
- [23] R.H. Giesen, J. Oerlemans, Response of the ice cap Hardangerjøkulen in southern Norway to the 20th and 21st century climates, *Cryosphere Discussions* 3 (2009) 947–993.
- [24] A. Lo Vecchio, M.G. Lenzano, S.M. Richiano, L.E. Lenzano, Identificación y caracterización litológica mediante el uso del sensor ETM+ (Landsat 7), *Revista de Teledetección* 2016 (2016).
- [25] S.N. Moragues, M.G. Lenzano, A. Lo Vecchio Repetto, D. Falaschi, L.E. Lenzano, Surface velocities of Upsala glacier, Southern Patagonian Andes, estimated using cross-correlation satellite imagery: 2013-2014 period, (2018).
- [26] D. Bustos, *Monitoreo del Complejo Volcánico Nevados de Chillán con base en observaciones InSAR*, Tesis doctoral, Universidad de Concepción, 2018.
- [27] S. Yépez, W. Torres, R. Rebolledo, Metodología para la estimación de flujo en el glaciar “Buenos Aires”, Bahía Esperanza, Península Antártica, *Interciencia* 37 (2012) 492–497.
- [28] M.F. Monterroso-Tobar, J.M. Londoño-Bonilla, S. Samsonov, Estimación del retroceso glaciar en los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, Colombia a través de imágenes ópticas y Din-SAR, *Dyna (Medellin)* 85 (2018) 329–337.
- [29] J. Araos, M.A. Godoi, R. Carralvo, Variaciones recientes del lóbulo Zapata Sur, Glaciar Tyndall: Campo de Hielo Patagónico Sur (Chile), *Revista de Geografía Norte Grande* (2007) 75–84.
- [30] J. Cortés-Ramos, H. Delgado-Granados, Reconstruction of glacier area on Citlaltépetl volcano, 1958 and implications for Mexico’s deglaciation rates, *Geofísica Internacional* 54 (2015) 111–125.
- [31] S.A. Macdonell, S.J. Fitzsimons, Observations of cryoconite hole system processes on an Antarctic glacier, *Revista Chilena de Historia Natural* 85 (2012) 393–407.
- [32] B.G. Mark, A. French, M. Baraer, M. Carey, J. Bury, K.R. Young, M.H. Polk, O. Wigmore, P. Lagos, R. Crumley, Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes, *Glob Planet Change* 159 (2017) 61–76.
- [33] C. Durán-Alarcón, C.M. Gevaert, C. Mattar, J.C. Jiménez-Muñoz, J.J. Pasapera-Gonzales, J.A. Sobrino, Y. Silvia-Vidal, O. Fashé-Raymundo, T.W. Chavez-Espiritu, N. Santillan-Portilla, Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery, *J South Am Earth Sci* 59 (2015) 19–26.
- [34] W. Silverio, J.-M. Jaquet, Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery, *Remote Sens Environ* 95 (2005) 342–350.

- [35] P. Burns, A. Nolin, Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010, *Remote Sens Environ* 140 (2014) 165–178.
- [36] A. Cerrón Contreras, Estrategias de calefacción pasiva y su impacto en el confort térmico de los pobladores en viviendas altoandinas en Apurímac, año 2022, (2024).
- [37] J. Ceballos, E. Tobón, Glaciares Colombianos: evolución reciente y estado actual, *Boletín de Geología* 29 (2007) 143–151.
- [38] F.J. Navarro, Sea-level rise: Which is the role of glaciers and polar ice sheets?, *Metode Sci Stud J* (2021) 173–181.
- [39] G. Ontiveros-González, H. Delgado-Granados, J. Cortés-Ramos, Surface Energy Balance model for high-altitude glacial system at 19 N on Glaciar Norte, Mexico, *Geofísica Internacional* 54 (2015) 299–314.
- [40] L.-D. Carpio, I. Taype-Huamán, Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú, *Uniciencia* 35 (2021) 27–45.
- [41] F.J. Vasconez, L. Maisincho, S.D. Andrade, B. Cáceres, B. Bernard, C. Argoti, E. Telenchana, M. Almeida, S. Almeida, V. Lema, Secondary lahars triggered by periglacial melting at Chimborazo volcano, Ecuador, *Revista Politécnica* 48 (2021) 19–30.
- [42] K. Ingenloff, A.T. Peterson, Trans-Amazon dispersal potential for *Crotalus durissus* during Pleistocene climate events, *Biota Neotrop* 15 (2015) e20130081.
- [43] D. Christie, Balance de masa glaciar, *Revista de Geografía Norte Grande* (2016) 239–241.
- [44] M.Á. Tavera Escobar, N. Estrada Sierra, C. Errázuriz Henao, M. Hermelin, Georutas o itinerarios geológicos: un modelo de geoturismo en el Complejo Volcánico Glaciar Ruiz-Tolima, Cordillera Central de Colombia, *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 26 (2017) 219–240.
- [45] C. Díaz Bravo, Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahúe y Cahuelmó durante el período 1985-2017, Tesis de pregrado, Universidad de Chile, 2018. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/153015> (accessed July 23, 2024).
- [46] F.S. Monge-Rodríguez, C. Huggel, L. Vicuna, Percepción del deshielo glaciar y el cambio climático en pobladores andinos de Perú: abordaje interdisciplinario, *Ambiente & Sociedade* 25 (2022) e02272.
- [47] C.C.L. Peña, M. De Moraes, Efectos del Cambio Climático sobre los glaciares del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* 56 (2020) 5–13.
- [48] J.K. Malmros, S.H. Mernild, R. Wilson, T. Tagesson, R. Fensholt, Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016), *Remote Sens Environ* 209 (2018) 240–252.
- [49] R.E. Corrales, V.L. Ochoa, Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE, *Ciencias Espaciales* 9 (2016) 81–96.
- [50] C. Loyola Gómez, J. Rivas Maldonado, M.J. Gacitúa Rojas, Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile, *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24 (2015) 73–86.
- [51] C. Lara, G.S. Saldías, A.L. Paredes, B. Cazelles, B.R. Broitman, Temporal variability of MODIS phenological indices in the temperate rainforest of Northern Patagonia, *Remote Sens (Basel)* 10 (2018) 956.