

Spatiotemporal analysis of glacial retreat at the Coropuna and Solimana volcanoes in Peru, using NDWI calculation between 1986 - 2022

Fabrizio Alexander Viera Castañeda¹, Maria Fernanda Villena Cortegana², Antonio Joaquín Liendo Perea³, Daniela Kristel Bolívar Fernández⁴, Andrea Jazlynn Rodríguez Paredes⁵; Ulises Francisco Giraldo Malca, Magister⁶

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - Perú, ¹u202110999@upc.edu.pe ²u20201a205@upc.edu.pe
³u20181c930@upc.edu.pe, ⁴u202114035@upc.edu.pe ⁵u202016217@upc.edu.pe, ⁶pcigugir@upc.edu.pe

Abstract - In recent decades, the deglaciation of tropical snow-capped mountains represents a reduction in water storage for populations, economic activities, and ecosystems that depend on their waters, especially in arid areas such as the foothills of the Ampato mountain range in the department of Arequipa, in the Andes of southern Peru, being necessary to determine the factors that drive it, such as its relationship with global warming and other relevant meteorological phenomena. In this sense, the objective of the research was to determine the relationship between the glacier loss area in the Coropuna and Solimana stratovolcanoes with the variation of temperatures and precipitations registered in the nearest meteorological stations during the period 1986 to 2022. For this, the surface of the glaciers was determined with multispectral Landsat images of each year, using the normalized differential water index calculation in the QGIS software, to correlate with the main elements of the climate of the area. As results of the analysis, a 64% reduction in the glacier area was determined, presenting a stronger correlation with the increase in maximum temperature, compared to weaker relationships with a stable minimum temperature and strongly fluctuating rainfall with a slightly increasing trend. It is concluded that there is a marked trend of glacier mass loss, reducing the Coropuna mountain to less than half of the maximum extension it presented in 1989, being more accentuated in the Solimana mountain that maintains only 4% of the area it had that same year. Likewise, in the previous or initial period of a strong El Niño-Southern Oscillation event, there is a temporary recovery of the glacier area, but it is followed by a period with a strong loss of glacier mass due to an increase in temperature and liquid precipitation during the most intense stage of the event.

Keywords: Deglaciation, ENSO, climate change, glacial retreat, remote sensing.

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

Análisis espaciotemporal del retroceso glaciar en los volcanes Coropuna y Solimana en Perú, mediante el cálculo del NDWI entre 1986 - 2022

Fabrizio Alexander Viera Castañeda¹, Maria Fernanda Villena Cortegana², Antonio Joaquín Liendo Perea³, Daniela Kristel Bolívar Fernández⁴, Andrea Jazlynn Rodríguez Paredes⁵; Ulises Francisco Giraldo Malca, Magister⁶

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - Perú, ¹u202110999@upc.edu.pe ²u20201a205@upc.edu.pe ³u20181c930@upc.edu.pe, ⁴u202114035@upc.edu.pe ⁵u202016217@upc.edu.pe, ⁶pcigugir@upc.edu.pe

Resumen - En las últimas décadas la deglaciación de los nevados tropicales representa una reducción del almacenamiento hídrico para poblaciones, actividades económicas y ecosistemas que dependen de sus aguas, especialmente en zonas áridas como las vertientes de la cordillera del Ampato en el departamento de Arequipa, en los Andes del sur de Perú, siendo necesario determinar los factores que lo impulsan, como su relación con el calentamiento global y otros eventos climatológicos relevantes. En ese sentido el objetivo de la investigación fue determinar la relación entre la pérdida de área glaciar en los estratovolcanes Coropuna y Solimana con la variación de temperaturas y precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas más próximas durante el periodo 1986 a 2022. Para ello, se determinó la superficie de los glaciares con imágenes multiespectrales Landsat de cada año, mediante el cálculo del índice diferencial normalizado de agua en el software QGIS, para ser correlacionada con los principales elementos del clima de la zona. Como resultados del análisis, se determinó una reducción de área glaciar de 64%, presentando una correlación más fuerte con el incremento de la temperatura máxima, en comparación con relaciones más débiles frente a una temperatura mínima estable y precipitaciones fuertemente fluctuantes con una ligera tendencia incremental. Se concluye que existe una marcada tendencia de pérdida de masa glaciar, reduciendo al nevado Coropuna a menos de la mitad de la máxima extensión que presentó en 1989, siendo más acentuada en el Nevado Solimana que mantiene apenas un 4% del área que tuvo ese mismo año. Asimismo, en el periodo previo o inicial de un evento El Niño-Oscilación del Sur de fuerte intensidad se presenta una recuperación temporal del área glaciar, pero es seguido de un periodo con fuerte pérdida de masa glaciar por incremento de temperaturas y precipitaciones líquidas durante la etapa de mayor intensidad del evento.

Palabras clave: Deglaciación, ENOS, cambio climático, retroceso glaciar, teledetección.

I. INTRODUCCIÓN

Según el Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia, menciona que la reducción anual de los glaciares se viene acelerando, de 227,000 millones de toneladas de hielo entre 2000 y 2004, a 298,000 entre 2015 y 2019 [1], siendo un proceso que se inició décadas atrás. Tal como precisa el reporte de *National Geographic*, desde 1961 hasta el 2016 se han

perdido 9.6 gigatoneladas de hielo, lo que ha generado que el nivel del mar se incremente en 27 milímetros [2]. A lo largo de los últimos 50 años, se ha evidenciado que los glaciares a nivel mundial vienen disminuyendo a causa del calentamiento global. Para Zemp, esto supone la pérdida de 335,000 millones de toneladas de hielo al año aproximadamente, lo que equivale a un aumento del nivel del mar de casi 1 mm por año [2].

Desde el inicio del desarrollo de la especie humana se han generado impactos ambientales a causa de la necesidad de supervivencia y adaptación, pero no fue hasta la primera revolución industrial cuando estos repercutieron en el medio ambiente de manera más intensa, debido a la emisión de una mayor cantidad de gases residuales, aguas servidas y residuos sólidos, así como el incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, capaces de retener más energía solar cerca de la superficie en forma de calor [3]. Como resultado, se ha generado el aumento de la temperatura media global y el debilitamiento de la capa de ozono [4]. Un claro efecto de esto es el deshielo de los casquetes polares y glaciares montanos que, al ser importantes fuentes de agua limpia, su desaparición significaría el probable colapso de sociedades y ecosistemas [5].

Cabe resaltar que los glaciares son masas de hielo, nieve, aire, agua y derrubios de rocas situadas en la superficie terrestre en la cumbre de las montañas, cuyo tamaño es variable según la época del año [6], con superficies que pueden medir hasta el tamaño de un campo de fútbol (0.5 hectáreas) [7]. Durante la época con mayor insolación (aumento de la temperatura) se derriten y reducen de tamaño. Caso contrario ocurre en los meses más fríos, cuando los glaciares se recuperan y aumentan de volumen gracias a las precipitaciones sólidas que reciben [8].

El retroceso glaciar se ha vuelto un fenómeno secular, debido a su alta vulnerabilidad frente al cambio climático, que incluye variaciones anormales en el comportamiento del clima, como una incidencia de radiación solar más fuerte o de una mayor variabilidad en el inicio y duración de las precipitaciones estacionales. Además, los glaciares son un factor relevante para el manejo del recurso hídrico, puesto que, influyen en diversos aspectos. La disminución de masas de hielo afecta a los ríos que nacen de ellas, como principal fuente de almacenamiento de agua. Este hecho trasciende a la flora y fauna de los ecosistemas

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

montañosos [9], afectando a sus habitantes, su economía e industrias.

Por último, la deglaciación tiene un efecto colateral en la calidad del agua, debido a que, al suscitarse el retroceso de masas de hielo, las rocas subyacentes quedan expuestas y el hielo convertido en agua, lava los minerales de las rocas, incorporando metales pesados a su flujo y alterando sus propiedades fisicoquímicas, con la consecuente degradación de la calidad ambiental del recurso hídrico [10].

El Perú concentra el 70% de glaciares tropicales de todo el mundo [11], también conocidos como glaciares de latitudes bajas que, a diferencia de glaciares de latitudes más altas, tienen un menor volumen de hielo [12], usualmente se encuentran por encima de los 5,000 m s.n.m., en el sector de oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde la amplitud diurna es poco cambiante, teniendo a lo largo de todo el año más de 10 horas de radiación solar diarias. Este tipo de glaciares son particularmente más afectados por procesos climáticos de la troposfera en los trópicos, como la ocurrencia del El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) [13]; por lo tanto, se viene estudiando cómo podría afectar a las poblaciones humanas, como fuentes de agua regionales, y como desencadenantes de riesgos naturales [14]. Por su parte, Suárez nos manifiesta que las precipitaciones no están cambiando significativamente, pero donde antes nevaba, hoy llueve (agua líquida), lo que acelera el proceso de derretimiento del glaciar al recibir más energía que antes [15].

ENOS es un evento natural de la variabilidad climática en el que se interrelacionan el océano y la atmósfera en la región tropical del Océano Pacífico, ocurriendo cada 4 a 8 años y suele durar entre 12 a 18 meses [16]. Se le considera el modelo climático más grande del mundo en la escala de tiempo interanual, debido a que influye en el clima global a través de la tele-conexión atmosférica, causando severas alteraciones climáticas que pueden provocar innumerables desastres naturales alrededor de todo el mundo [16]. En el Perú, este fenómeno se caracteriza por el calentamiento de las aguas del mar frente a sus costas, que provoca cambios en los patrones climáticos de la desértica vertiente occidental de los Andes, y la aceleración del retroceso glaciar con el incremento de la temperatura y las precipitaciones [17]. En ese sentido, su análisis y predicción es particularmente importante para aplicación de medidas de contingencia que reduzcan sus estragos sobre las poblaciones afectadas [18]. Según Motschmann et al., la ocurrencia del ENOS presentaría efectos sobre los glaciares por la modificación de sus condiciones atmosféricas, en especial, el aumento de temperaturas que se da entre los trópicos para esos años [14]. En ese sentido, los ENOS de mayor intensidad que se ha tenido en las últimas siete décadas, corresponden a los periodos 1982-1983, 1997-1998 (extraordinarios) y 2015-2016 (fuerte) [19].

Según Turpo Cayo, el Perú desde 1990 ha perdido aproximadamente 700 km² de glaciares [20], y en los últimos 50 años el 51% de toda su superficie, debido a los efectos del cambio climático. Un antecedente reportado por Santillán y

García es el retroceso glaciar del Pastoruri en la cordillera Blanca, que, según datos de la subunidad de Estudios Glaciológicos, desde 1995 a 2013 afirman que existió un 52.12% de reducción de su área glaciar [21], que significó la pérdida del principal espacio que tenía el país para el desarrollo de deportes de invierno. Esta problemática se evidencia en todas las cordilleras del Perú, pues 11 de ellas se encuentran en peligro de desaparecer en los próximos 20 años, siendo una de estas la cordillera Ampato, donde se encuentran ubicados los nevados Coropuna y Solimana, que según la comparación del primer inventario de fotografías aéreas realizadas en el año 1970 por Hidroandina; y el inventario realizado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en el 2010 tendría una pérdida del 58% [22].

El nevado Coropuna aporta aguas a las cuencas de los ríos Camaná, Ocoña y Quilca-Vitor-Chili, que poseen 155, 196 y 25 lagunas respectivamente, siendo de vital importancia porque son fuente de agua para poblaciones y diversas actividades productivas, principalmente agropecuarias, en 5 provincias del departamento de Arequipa: Castilla, Condesuyos, Camaná, Caravelí y La Unión. Por lo tanto, es necesario estudiar la evolución del glaciar y determinar los factores que está influyendo en su variación, para brindar información útil a las entidades encargadas de prever los posibles escenarios que se proyecten en el futuro, en favor de una adecuada gestión del agua en su ámbito de influencia. En ese sentido el objetivo de esta investigación es determinar la relación de los cambios en el área glaciar en los estratovolcanes Coropuna y Solimana, con la variación de los elementos climatológicos en el ámbito de la cordillera del Ampato y la ocurrencia de eventos del ENOS en el periodo 1986 - 2022.

II. ÁREA DE ESTUDIO.

El nevado Coropuna está ubicado geográficamente en las coordenadas 15°31'13"S; 72°39'26"O, y el nevado Solimana, ubicado en las coordenadas 15°24'36"S; 72°53'35"O, son estratovolcanes que forman parte de la Cordillera de Ampato en las provincias de Condesuyos y Castilla, departamento de Arequipa (**Figura 1**), cuya cumbre más alta alcanza los 6,426 m s.n.m. Según el MINAGRI y otros autores, al año 1955 el Coropuna tenía un glaciar que se extendía en un área de 122.70 km², para 1962 se redujo a 82.6 km², en el año 1986 tenía 67.16 km², al 2000 su extensión era de 60,8 km² y para el año 2010 se redujo a tan solo 49.02 km² [23][24], siendo el factor de retroceso glaciar promedio de 1.67 km² por año. Asimismo, el Coropuna posee la estructura volcánica más amplia y alta del Perú con un diámetro basal aproximado de 20 km, ubicado a 110 km de la Costa del océano Pacífico. Es un volcán calificado como latente porque no tiene actividad hace aproximadamente 700 años, pero presenta una leve actividad hidrotermal [25].

Geomorfológicamente se distinguen cuatro tipos de unidades: áreas glaseadas o de nieves perpetuas, relieve montañoso, relieve altiplánico ondulado y relieve montañoso denudativo, cuya base está ubicada a una cota de 4,200 m s.n.m [26]. Según Núñez y Valenzuela, la reactivación de la cámara

magmática del estratovolcán tendría posiblemente efectos catastróficos, al derretirse su glaciar, generando la formación de lahares que se desplazarán por el lecho de los ríos Grande, Tastane y Llaclla (nacientes del río Majes), afectando a los habitantes de zonas aguas abajo hasta la costa [26].

En los diversos pisos altitudinales del volcán se forman diferentes biomas donde interactúan especies de flora y fauna andina, como los bofedales, ubicados a partir de los 4,000 m s.n.m que vienen a ser humedales formados por vegetación densa, o los matorrales de puna seca donde hay mejores condiciones de temperatura y humedad debido a su cercanía al volcán, allí es común encontrar especímenes con el Cándor Cebolla (*Werneria nubigena*), entre los 3500 a 3900 m s.n.m. y diferentes especies de arbustos como *Lupinus sp.*, *Baccharis sp.* y *Parastrephya lepidopylla* [11]

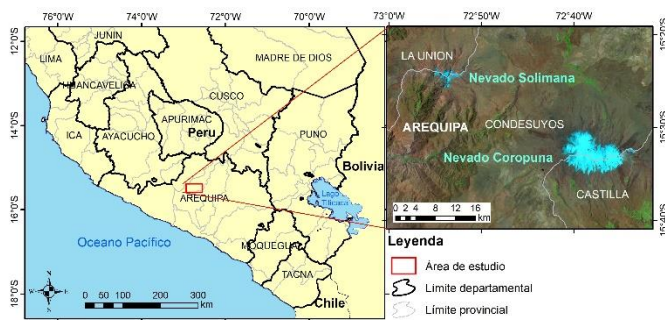


Figura 1. Mapa de ubicación de los nevados Solimana y Coropuna.

III. MÉTODOS:

A. Tipo de investigación y revisión bibliográfica.

La presente investigación es cuantitativa de tipo exploratorio y correlacional, desarrollada por medio de técnicas computacionales y estadísticas. Se realizó una búsqueda de información a través de fuentes confiables como artículos de *journals* pertenecientes a las bases de datos *SCOPUS*, *Web of Science*, *Scielo*, entre otros, además de informes técnicos de instituciones competentes en el monitoreo de glaciares y climas como el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña de Perú (INAIGEM), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ANA, y Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM).

B. Procesamiento de la data de estaciones meteorológicas.

Con la finalidad de analizar las condiciones meteorológicas del área de estudio se extrajo data histórica de precipitación y temperatura del portal web del SENAMHI, seleccionando las estaciones meteorológicas que se encontraran en zonas aledañas al área de estudio (Tabla I). Usando la herramienta de Tabla Dinámica en el software Microsoft Excel se procesó la data de precipitaciones y temperaturas para determinar su comportamiento a lo largo del todo el periodo de análisis, especialmente, las variaciones que habría tenido el régimen de precipitaciones y temperaturas en el ámbito.

TABLA I
ESTACIONES METEOROLÓGICAS PROCESADAS EN LOS ALREDEDORES DE LOS NEVADOS COROPUNA Y SOLIMANA.

Nombre	Provincia	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud m s.n.m.
Andahua	Castilla	Andagua	15°30'3" S	72°21'18" O	3,562
Machahuay	Castilla	Machaguay	15°39'12" S	72°30'12" O	3,093
Chichas	Condesuyos	Chichas	15°32'53" S	72°55'6" O	2,161
Chachas	Castilla	Chachas	15°30'9" S	72°16'7" O	3,065
Chuquibamba	Condesuyos	Chuquibamba	15°50'46" S	72°39'2" O	2,859
Pampacolca	Castilla	Pampacolca	15°43'.2" S	72°34'6" O	2,885
Coropuna	Condesuyo	Salamanca	15°32'9.5" S	72°36'38" W	5800

C. Cálculo del área glaciar con imágenes satelitales

La estimación del área glaciar que presentaron los nevados Coropuna y Solimana, en el cuadrante definido por las coordenadas geográficas 15°23'6"S - 15°35'24"S; 72°33'O - 72°56'6"O, se realizó mediante el procesamiento y fotointerpretación de imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5 TM (1986 - 2011), Landsat 7 ETM+ (2002 y 2012) y Landsat 8 OLI-TIRS (2013 - 2022), obtenidas de la plataforma web GloVis (*Global Visualization Viewer*) del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (*United States Geological Survey -USGS*). Se seleccionó una imagen por año, tomando como criterios de selección que el área de interés esté libre de cobertura de nubes y que tenga la menor área con cobertura glaciar para ese año, preferentemente al final de la estación seca (agosto - noviembre). Su procesamiento se hizo en el software de código libre QGIS, mediante el complemento "*Semi-Automatic Classification Plugin*" para la corrección atmosférica y la composición de las imágenes. Seguidamente se hizo el cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (*Normalized Difference Water Index - NDWI*), como método para identificar cuerpos de agua abiertas mediante imágenes satelitales, usando la radiación reflejada del infrarrojo cercano y la luz verde visible [27]. El cálculo del NDWI se realiza con la herramienta "Calculadora Ráster" utilizando las bandas *Green* y *Short-wave infrared 1 (SWIR1)*. Como tercer paso, se realizó una reclasificación de la imagen resultante del NDWI para diferenciar las zonas cubiertas con hielo y nieve (0 a 1), de los demás tipos de superficie (-1 a 0). Finalmente se realizó la conversión de la imagen reclasificada usando la herramienta "Poligonizar (Ráster a vectorial)" para facilitar el cálculo del área glaciar presente en el área de estudio para cada año, descartando todos los hallazgos con áreas menores a 0.5 hectáreas.

IV. RESULTADOS:

El procesamiento de las imágenes satelitales mostró que el retroceso glaciar en las cumbres de los estratovolcanes Coropuna y Solimana (**Figura 2**), que en el año 1986 contaba con una extensión de 8,327 hectáreas, para el año 2004 registraba 8,099 hectáreas y para el año 2022 se redujo a 4,299 hectáreas, que a su vez constituye el valor más bajo de todo el periodo de análisis. Asimismo, la extensión que tuvo el glaciar

de Coropuna el 2022 con 4,173 hectáreas, tan solo constituye el 45% de lo que tuvo en 1989, año que registró su mayor extensión con 9,232 hectáreas. A su vez, el glaciar del nevado Solimana tuvo la menor extensión registrada en 2019 con 114 hectáreas que representa apenas el 4.4% del máximo registro en 1989 con 2,582 hectáreas (**Figura 3**).

Las temperaturas medias anuales y las máximas promedio muestran una tendencia incremental entre los años 1999 y 2022 en las estaciones meteorológicas Machaguay y Andahua, al igual que las precipitaciones entre 1984 y 2022, siendo en ambos casos de tendencia decreciente, inversa a la variación anual del área glaciar de los nevados Coropuna y Solimana (**Figura 2**). A diferencia de las otras variables, se observó que, en el caso de los promedios de temperaturas mínimas, la línea de tendencia no muestra variación significativa a lo largo de todo el periodo de análisis.

Se aprecia que algunos años como el 2001, 2010, 2013 y 2019, presentan un aumento de la temperatura máxima y la temperatura promedio en relación con los registros del año anterior, los cuales coinciden con una apreciable reducción del área glaciar en ambos nevados. Asimismo, los años 2002, 2004, 2011 y 2020 muestran temperaturas máximas y promedios que decrecen, mientras que el área glaciar aumenta con relación al año anterior.

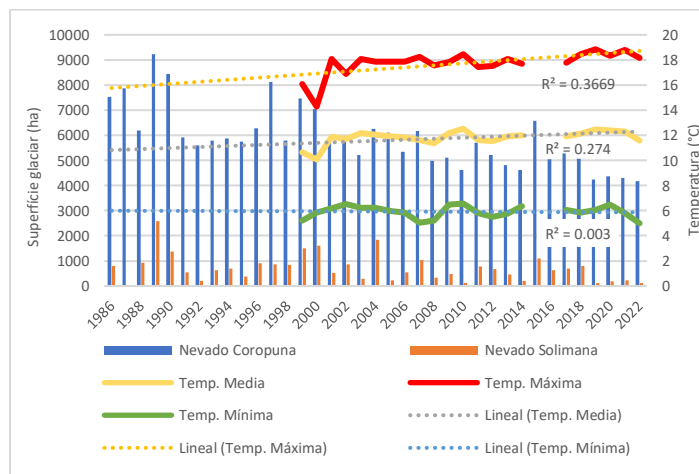


Figura 2. Variación del área glaciar de nevados y temperaturas de la estación meteorológica de Machaguay.

El glaciar de Coropuna muestra registros con un máximo crecimiento, donde su área tiene un aumento considerable en relación con el año anterior seguido de años con valores más bajos, como un ciclo evolutivo, que muestra una tendencia negativa porque progresivamente viene disminuyendo. Por ejemplo, en el año 1989 tuvo un primer valor máximo con 9,231.5 hectáreas, seguido del año 1997 al presentar un valor pico de 8,120.1 hectáreas, siendo el siguiente el año 1999 con una extensión de 7,457 hectáreas, y un último valor pico en el año 2015 con 6,575.7 hectáreas.

Al comparar el área glaciar de los nevados de Coropuna y Solimana, se aprecia un comportamiento similar en el aumento o disminución del área glaciar en 29 de 36 periodos interanuales

(81%). En el caso de los periodos en que muestran patrones distintos, en 1986-1987 y 1996-1997, el nevado Coropuna aumenta su área glaciar y el nevado Solimana disminuye, que coinciden con la ocurrencia del ENSO moderado de 1986-1987 y con la etapa inicial del ENSO extraordinario de 1997-1998. Asimismo, para los periodos 1987-1988, 1999-2000, 2005-2006, 2017-2018 y 2020-2021 se observa que el área glaciar del nevado Coropuna disminuye y la del nevado Solimana aumenta.

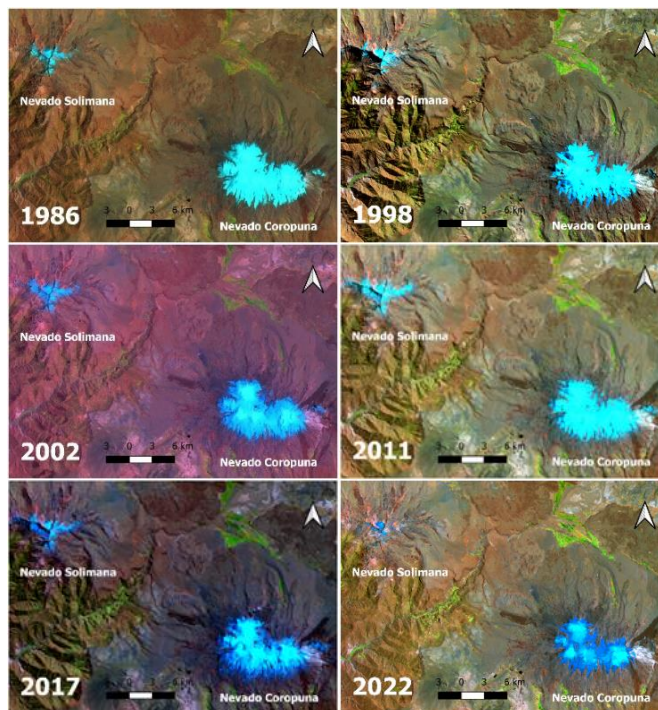


Figura 3: Evolución del área glaciar de los nevados Coropuna y Solimana entre los años 1984 y 2022 (Escenas Landsat 5 TM y 8 OLI-TIRS).

Los años que presentaron la ocurrencia de eventos ENSO de fuerte intensidad dentro del periodo de análisis fueron el ENSO extraordinario de 1997-1998 y el ENSO fuerte de 2015-2016, teniendo en el primero un impacto negativo en ambos nevados al perder 2346.1 hectáreas de glaciar, y en el segundo una reducción de 2002.9 hectáreas en total.

Al comparar el área glaciar del área de estudio con la temperatura media anual de la estación meteorológica Machaguay mediante una correlación (más cercana al nevado Coropuna), se aprecia una $R^2=0.5176$, valor que se incrementa frente al promedio de la temperatura máxima de la misma estación al tener una $R^2=0.5425$, mientras que ante el promedio de la temperatura mínima la correlación baja a una $R^2=0.038$. En el caso del nevado Coropuna se observa que los resultados de correlación se incrementan ligeramente (Temperatura máxima: $R^2=0.5531$; temperatura media: $R^2=0.5295$; temperatura mínima: $R^2=0.036$), pero para la extensión del nevado Solimana disminuyen (Temperatura máxima: $R^2=0.4157$; temperatura media: $R^2=0.3938$; temperatura mínima: $R^2=0.0336$). Asimismo, se obtuvo como resultado una

correlación marginal entre los volúmenes de precipitaciones que registra la zona con la variación de área glaciar de ambos nevados por tener valores muy bajos (Ambos nevados $R^2=0.0058$; Coropuna $R^2=0.0004$; Solimana: 0.0375). Finalmente, al comparar los datos de área glaciar con los valores de temperaturas y precipitaciones de la estación meteorológica de Andagua, se obtuvo valores de correlación muy bajos ($R^2 < 0.104$).

V. DISCUSIÓN:

Los resultados del procesamiento de imágenes satelitales confirman una pérdida de masa glaciar en los nevados de Coropuna y Solimana en la cordillera volcánica del Ampato, que estaría siendo impulsada por el incremento de la temperatura máxima que registra la estación meteorológica de Machaguay. Para el caso del glaciar del nevado Coropuna (Figura 4), la estación está ubicada aproximadamente a 13 kilómetros de distancia, teniendo el promedio anual de temperaturas máximas una correlación regularmente fuerte con el área glaciar ($R^2 = 0.5531$), a diferencia de la correlación que mostró el promedio anual de las temperaturas mínimas, presentando una relación mucho más débil ($R^2 = 0.036$).

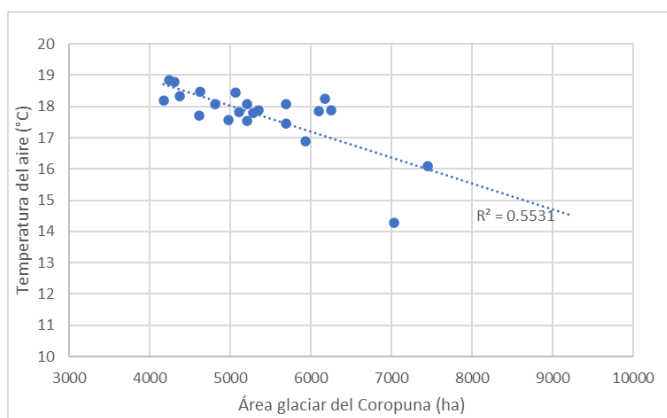


Figura 4: Correlación de la temperatura máxima anual en la estación meteorológica de Machaguay y el área glaciar del nevado Coropuna.

Para el caso del nevado Solimana (Figura 5), el incremento de la temperatura máxima que registra la estación meteorológica de Machaguay, ubicada a aproximadamente a 49 kilómetros de distancia de su glaciar, muestra una correlación similar pero ligeramente más baja ($R^2 = 0.4157$) en relación con los resultados del Nevado Coropuna. Finalmente, para el promedio anual de las temperaturas mínimas presentó un valor de correlación bastante bajo ($R^2 = 0.0336$) al igual que en el caso anterior. Frente a ello, se deduce que el proceso de retroceso glaciar en el caso de los nevados de la cordillera del Ampato estaría impulsado por un incremento de la temperatura durante el día (con radiación solar), mas no por un frío nocturno menos intenso, porque las temperaturas mínimas en la zona tienen una tendencia a mantener los mismos niveles a lo largo de todo el periodo de análisis.

De acuerdo con los resultados de la correlación entre el área glaciar total y las temperaturas promedio máximas, mínimas y medias anuales, se observa una relación inversa más fuerte con la variación de la temperatura máxima, superior a $R^2 = 0.5425$, mostrando también una nula relación con la temperatura mínima al tener una $R^2 = 0.038$. Estos resultados confirman la coincidencia hallada entre las variables mencionadas, puesto que en años en los que las temperaturas máximas y las promedio se elevan coinciden con un registro de área glaciar menor al año anterior, y cuando las temperaturas máximas y promedio disminuyen, el área glaciar se incrementa. Ello se debería a que el calentamiento global en esta zona se manifiesta con el incremento de las temperaturas máximas, más no implican el incremento de las temperaturas mínimas, cuya fluctuación no muestra tendencias de aumento ni de descenso claros.

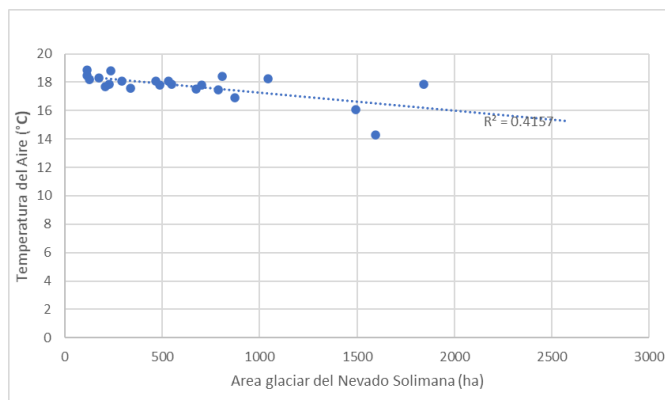


Figura 5: Correlación de la temperatura máxima anual en la estación meteorológica de Machaguay y el área glaciar del nevado Solimana

Se observó algunos registros que no se ajustaron a las tendencias antes mencionadas como: el año 2007 que presenta un incremento de la temperatura máxima en relación al año anterior, pero en este caso el área glaciar también muestra una expansión, fenómeno que tendría su explicación en que ese año el valor de la temperatura mínima tiene un marcado descenso, que provoca incluso el descenso de la temperatura media, lo que habría dado las condiciones necesarias para una pequeña recuperación del área glaciar. Asimismo, en el 2008, todas las temperaturas disminuyeron en relación con el año anterior, al igual que el área glaciar, lo que se debería a la menor precipitación anual que registraron consecutivamente los años 2007 y 2008. Finalmente, en el 2009 se muestra un ligero incremento en el área glaciar, en un año en que todas las temperaturas se incrementan, pero coincide con un periodo con mayores precipitaciones que supera el promedio anual de todo el periodo de análisis.

Los glaciares del ámbito muestran ciclos de expansión y decrecimiento que se suceden cada 4 a 8 años, pero que muestran una tendencia negativa, lo que implica que años en los que los nevados recuperan masa glaciar, gracias a inviernos más intensos con mayores precipitaciones sólidas, desde la década de 1990 tendrían condiciones menos favorables para la

formación de hielo, por presentar temperaturas más altas a las que tenían en décadas pasadas, o por recibir una mayor proporción de precipitaciones líquidas.

A pesar de no contar con información de las temperaturas del año 1998, el fuerte decremento del área glaciar en ambos nevados se debería al incremento de temperaturas que generó la ocurrencia del ENOS extraordinario de 1997-1998. Curiosamente un fenómeno similar se aprecia en el periodo 2015-2016 correspondiente al periodo de ocurrencia del ENOS clasificado de intensidad fuerte, que sería el factor que impulsó la reducción de la superficie glaciar en los nevados objeto de estudio. Esta relación se debería al efecto que tienen los eventos del ENOS de fuerte intensidad en el territorio peruano, especialmente en la costa y la cordillera de los Andes, al incrementar significativamente las temperaturas y la proporción de precipitaciones líquidas sobre la superficie, siendo ambos elementos meteorológicos impulsores del derretimiento de masas de hielo.

En el año 1997 se inicia el ENOS extraordinario que generó temperaturas anómalas en los Andes del Sur de Perú, al igual que en 2015 al dar inicio el ENOS de fuerte intensidad [28], que habrían presentado condiciones atmosféricas favorables a la recuperación de los glaciares, registrando para noviembre de 1997 una expansión de 1,782.2 hectáreas (25% más del registro anterior) y para agosto de 2015 un crecimiento de 2,847.1 hectáreas (59% más del registro anterior).

Sin embargo, estas recuperaciones a corto plazo no son suficientes para revertir los efectos de la tendencia al aumento de la temperatura del aire en los Andes tropicales [12], como lo demuestra los registros de los años siguientes, en los que se experimentaron los efectos más intensos del incremento de la temperatura generados por el ENOS, con la pérdida de 2,346.1 hectáreas entre 1997 y 1998 (26% del registro anterior), y 2,002.9 hectáreas entre 2015 y 2016 (26% del registro anterior). Asimismo, en los años en los que se presentó el evento de la Niña, se observó en la mayoría de los casos (1988, 2001, 2010, 2013, 2018 y 2022) una significativa reducción en el área glaciar (promedio de 908.4 hectáreas por año), salvo en tres años (1996, 2007 y 2021) en los que presentó valores de incremento (promedio de 802.3 hectáreas por año), resultados que no permiten determinar si su ocurrencia genera algún efecto predominante en la variación del área glaciar en el área de estudio.

Las variaciones interanuales de las áreas glaciares de los nevados Coropuna y Solimana son similares en la mayoría de los casos, pero en algunos periodos son diferentes. Este fenómeno se debería a que a pesar de tener una ubicación próxima entre sí (30 kilómetros aproximadamente), en ocasiones o situaciones particulares, están expuestas a diferentes condiciones meteorológicas. Asimismo, los resultados muestran que las variaciones en el área glaciar del nevado Solimana son mucho más fuertes, llegando a presentar una reducción de hasta 88% entre 2004 y 2005, mientras que el nevado Coropuna registró reducciones de hasta 30% en el periodo 1990-1991, que se debería a una mayor resistencia del

glaciar del Coropuna por ser significativamente más grande, lo que implica tener un mayor volumen de hielo y a una mayor profundidad de la superficie. Por ello, glaciares más grandes tienen protegida una mayor proporción de su masa, de las condiciones del exterior en relación con glaciares de menor tamaño, que proporcionalmente tienen más masa glaciar expuesta a los cambios atmosféricos, como los producidos por el calentamiento global.

Se aprecia que existen valores máximos del área glaciar en los años 1989, 1997, 1999-2000, 2004, 2007, 2011 y 2015, que coinciden en la mayoría de los casos con periodos anuales que presentaron una disminución en las temperaturas, pero que muestran una tendencia negativa (menor área glaciar). En tanto en 1988, 1992, 1998, 2003, 2010, 2014 y 2022 se aprecian los valores mínimos para cada ciclo, observando que coincide con periodos en los que hubo un incremento de la temperatura máxima y media para los años 2003 y 2010, así como un incremento de la temperatura mínima para el año 2014.

VI. CONCLUSIONES:

La marcada tendencia de pérdida de masa glaciar de los nevados Coropuna y Solimana, representada por un retroceso del 48% de su área desde 1986, estaría producida por el aumento de las temperaturas máximas registradas en las últimas cuatro décadas, más no por variaciones en las temperaturas mínimas que muestran una tendencia estable, sin incrementos ni descensos apreciables.

Los eventos ENOS de fuerte intensidad que se produjeron entre 1986 y 2022, generaron en el periodo precedente o de inicio del evento (1996-1997 y 2014-2015) importantes incrementos en el área glaciar de ambos nevados, sin embargo, en el periodo siguiente (1997-1998 y 2015-2016) cuando se manifestaron con mayor fuerza, el incremento de temperaturas y la mayor proporción de precipitaciones líquidas provocaron una fuerte pérdida de masa glaciar.

La extensión y el volumen de la masa de hielo que tiene un glaciar es inversamente proporcional a su vulnerabilidad ante los cambios climatológicos que se produzcan en el exterior, que sería la razón por la que, a pesar de su cercanía, el nevado Solimana fue significativamente más afectado con relación al nevado Coropuna, por tener una mayor proporción de su masa glaciar expuesta a los cambios atmosféricos que está generando el calentamiento global.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran que el procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales y la aplicación del algoritmo NDWI, son herramientas prácticas y precisas para la evaluación y monitoreo de masas de hielo, por lo que se debería impulsar su uso, especialmente en las instituciones competentes, en la provisión de datos e información para una mejor atención a la problemática que plantea la pérdida de glaciares tropicales y la provisión de agua en regiones como los andes y la costa desértica del oeste sudamericano.

REFERENCIAS

- [1] R. Hugonnet *et al.*, “Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century,” *Nature*, vol. 592, no. 7856, pp. 726–731, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41586-021-03436-z.
- [2] M. Zemp *et al.*, “Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016,” *Nature*, vol. 568, no. 7752, pp. 382–386, Feb. 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1071-0.
- [3] A. Strahler and A. Strahler, *Geografía Física*, 3rd ed. Barcelona, España: Omega, 1989.
- [4] A. Emmer *et al.*, “Glacier retreat and associated processes since the Last Glacial Maximum in the Lejiamayu valley, Peruvian Andes,” *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 109, p. 103254, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jsames.2021.103254.
- [5] B. G. Mark and A. Fernández, “The Glacial Waterscape: Glaciers and Their Unique Geomorphological Connection to Society,” *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, pp. 281–289, 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00125-5.
- [6] L. C. P. Martín *et al.*, “Antarctic-like temperature variations in the Tropical Andes recorded by glaciers and lakes during the last deglaciation,” *Quat. Sci. Rev.*, vol. 247, p. 106542, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106542.
- [7] USGS, “Glaciares y capas de hielo: Depósitos de agua dulce.” Feb. 1997, [Online]. Available: <https://water.usgs.gov/gotita/earthglacier.html>.
- [8] G. Damonte, A. Cabrera, and F. Miranda, “Problemas vinculados al cambio y variabilidad climáticos y modelos ejemplares de adaptación por regiones en el Perú Informe Final Proyecto FORGE Autores.” Feb. 2017.
- [9] J. Knight, “The last glaciers in Africa and their environmental implications,” *J. African Earth Sci.*, vol. 200, p. 104863, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2023.104863.
- [10] S. Gilardoni, B. Di Mauro, and P. Bonasoni, “Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: A review,” *Glob. Planet. Change*, vol. 213, p. 103837, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.gloplacha.2022.103837.
- [11] INAIGEM, “INFORME TÉCNICO Coropuna 2018 Expedición científica Contenido.” 2018.
- [12] L. G. Thompson *et al.*, “The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records,” *Glob. Planet. Change*, vol. 203, p. 103538, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.gloplacha.2021.103538.
- [13] T. Mölg and G. Kaser, “Tropical Glaciers.” pp. 483–495, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-42584-5_19.
- [14] A. Motschmann *et al.*, “Current and future water balance for coupled human-natural systems – Insights from a glacierized catchment in Peru,” *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 41, p. 101063, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101063.
- [15] M. Jara, “La veloz pérdida de glaciares amenaza disponibilidad de agua en Sudamérica.” Feb. 2022, [Online]. Available: <https://ojo-publico.com/3577/la-perdida-glaciares-amenaza-disponibilidad-agua-sudamerica>.
- [16] W. S. Lavado-Casimiro, O. Felipe, E. Silvestre, and L. Bourrel, “ENSO impact on hydrology in Peru,” *Adv. Geosci.*, vol. 33, pp. 33–39, Feb. 2013, doi: 10.5194/adgeo-33-33-2013.
- [17] K. S. Johansen, B. Alftan, E. Baker, M. Hespings, T. Schoolmeester, and K. Verbist, *The Andean glacier and water atlas: the impact of glacier retreat on water resources*. UNESCO, 2018.
- [18] Z. Zhao, Y. Liu, and H. Dai, “Sea-glacier retreating rate and climate evolution during the marine deglaciation of a snowball Earth,” *Glob. Planet. Change*, vol. 215, p. 103877, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.gloplacha.2022.103877.
- [19] R. Martínez, E. Zambrano, J. J. N. López, J. Hernández, and F. Costa, “Evolución, vulnerabilidad e impactos económicos y sociales de El Niño 2015-2016 en América Latina,” *Investig. Geográficas*, no. 68, p. 65, Feb. 2017, doi: 10.14198/INGEO2017.68.04.
- [20] E. Y. Turpo Cayo *et al.*, “Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 9, p. 1974, Apr. 2022, doi: 10.3390/rs14091974.
- [21] N. Santillán and E. García, “Evaluación de glaciares tropicales, lagunas y bofedales en un contexto de cambio climático,” Lima-Perú, 2015. [Online]. Available: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/02/5.1-Evaluacion-de-glaciares-tropicales-lagunas-y-bofedales-Cambio-Climatico-ANA_NsantillanEgracia.pdf.
- [22] ANA, “Inventario de Glaciares y Lagunas,” Lima-Perú, 2014. [Online]. Available: <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/199/ANA0000015.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- [23] A. E. Racoviteanu, W. F. Manley, Y. Arnaud, and M. W. Williams, “Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes,” *Glob. Planet. Change*, vol. 59, no. 1–4, pp. 110–125, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.036.
- [24] A. T. Palacios, D. C. Ortiz, J. T. Castillo, and A. S. Martel, “Inventario nacional de glaciares y lagunas ministerio de agricultura y riego Autoridad Nacional del Agua Direccion de Conservacion y Planeamiento de recursos hidricos unidad de glaciologia y recursos hidricos UGRH-Huaraz inventario de glaciares del Peru (2da actualizacion).” Feb. 2014.
- [25] G. R. M. Bromley *et al.*, “In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru,” *Bull. Volcanol.*, vol. 81, no. 11, p. 64, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00445-019-1325-6.
- [26] S. Núñez Juárez and G. Valenzuela Ortiz, “Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán-nevado Coropuna,” Lima-Perú, Mar. 2001.
- [27] S. K. McFEETERS, “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, no. 7, pp. 1425–1432, May 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.
- [28] IGP, “Eventos El Niño y La Niña Costeros,” *Instituto Geofísico del Perú*. 2022, [Online]. Available: http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html.