

REMOTE SENSING EVALUATION OF THE EXPANSION OF THE PALCACOCHA LAKE AND GLACIAL RETREAT IN THE CORDILLERA BLANCA – PERU.

Rosa Maria Otiniano Zavala¹ , Angie Lucero Mulatillo Gomez² , Nicol Dayana Blas Mercado³ , Anthony Bryan Aguilar Chuquillanqui⁴ , y Ulises Francisco Giraldo Malca, Magister⁵ 
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, ¹ u202021074@upc.edu.pe, ² u20201b497@upc.edu.pe,
³ u20201a953@upc.edu.pe, ⁴ u20201b233@upc.edu.pe, ⁵ pcigugir@upc.edu.pe

Abstract- The increasing formation of glacial lakes and their expansion in recent years increases the risk of alluviums due to glacial lakes outburst floods in high tropical mountains, such as the one that destroyed part of the city of Huaraz in 1941 in the Cordillera Blanca, of the central Andes of Peru. Given the danger faced by the more than 130,000 people who inhabit the alluvial fan of Quilcay River, were analyzed the interannual variation of the surface of the Palcacocha Lake, the glacial surface of its micro-basin and the variation of the surrounding climate between the years 1984 and 2022, to determine the relationships that would exist between these variables, as an indicator of the risk of flooding due to overflow of the lake. For this, the surface of the lakes and the area of the glacier were calculated with multispectral Landsat images and compared with the result of the processing of meteorological data from the Recuay, Milpo, and Anta stations, using the data obtained from the Google Earth Engine application and data reported in bibliographic sources, for validation. A period of strong expansion of the lake was found until 2012 and a trend of loss of glacier surface; in addition, to a strong relationship between the expansion of the Palcacocha lake and the annual increase in global mean temperature. Likewise, a strong El Niño-Southern Oscillation event led to the growth of Lake Palcacocha due to increased rainfall and greater glacier retreat.

Keywords: Climate change, GLOF, ENSO, NDWI, glacier mass loss

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

EVALUACIÓN POR TELEDETECCIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA LAGUNA PALCACOCHA Y RETROCESO GLACIAR EN LA CORDILLERA BLANCA – PERÚ.

Rosa Maria Otiniano Zavala¹ , Angie Lucero Mulatillo Gomez² , Nicol Dayana Blas Mercado³ , Anthony Bryan Aguilar Chuquillanqui⁴ , y Ulises Francisco Giraldo Malca, Magister⁵ 
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, ¹ u202021074@upc.edu.pe, ² u20201b497@upc.edu.pe, ³ u20201a953@upc.edu.pe, ⁴ u20201b233@upc.edu.pe, ⁵ pcigugir@upc.edu.pe

Resumen- La creciente formación de lagunas glaciares y su expansión en los últimos años incrementa el riesgo de aluviones por el desborde violento de lagos glaciares en las altas montañas tropicales, como el que destruyó parte de la ciudad de Huaraz en 1941 en la cordillera Blanca de los Andes centrales de Perú. Ante el peligro en que se encuentran más de 130 mil personas que habitan el cono deyectivo del río Quilcay, se analizó la variación interanual del área superficial de la laguna Palcacocha, la superficie glaciar de su microcuenca y la variación del clima en los alrededores, entre los años 1984 y 2022, con el fin de determinar las relaciones que habría entre estas variables, como un indicador del riesgo de un aluvión por el desborde de la laguna. Para ello, se calculó la superficie de la laguna y el área glaciar con imágenes multiespectrales Landsat y se comparó con el resultado del procesamiento de data meteorológica de las estaciones de Recuay, Milpo y Anta, utilizando para su validación, datos obtenidos de la aplicación Google Earth Engine y datos reportados en fuentes bibliográficas. Se encontró un periodo de fuerte expansión de la laguna hasta 2012 y una tendencia de pérdida de superficie glaciar; además, de una fuerte relación entre la expansión de la laguna Palcacocha y el incremento anual de la temperatura media mundial. Asimismo, un evento El Niño-Oscilación del Sur de fuerte intensidad genera el crecimiento de la laguna Palcacocha por el incremento de lluvias y un mayor retroceso glaciar.

Palabras clave—Cambio climático, GLOF, ENOS, NDWI, pérdida de masa glaciar

I. INTRODUCCIÓN

El número, área y volumen de las lagunas de origen glaciar en el mundo se han incrementado en 53%, 51% y 48%, respectivamente, debido al cambio climático y retroceso glaciar, entre los años 1990 y 2018 [1]. Las lagunas glaciares afectan la disponibilidad de agua en los ríos de montaña y representan un peligro para la subsistencia de sus habitantes [2]. Además, la formación de estas lagunas glaciares constituye un riesgo de inundación ante un probable desborde violento de sus aguas (*Glacial lake outburst flood – GLOF*) [3].

Los GLOF son desastres naturales que afectan gravemente a las comunidades de montaña e impulsan grandes esfuerzos para desarrollar resiliencia a través de medidas de mitigación y desarrollo de políticas. Los impactos de los GLOF se extienden hasta cientos de kilómetros río abajo y pueden ocasionar gran cantidad de muertes humanas, pérdida de ganado y afectación de la infraestructura. Desde 1950, los GLOF han provocado la muerte de alrededor de 12,500 personas en todo el mundo, de los cuales el 88% se produjeron en solo 2 eventos [4]. Un estudio de Veh et al. informó 2,000 eventos GLOF en todo el mundo, entre el periodo de 1901 a 2017, ocurridos en las regiones de los Andes, el noroeste del Pacífico, Islandia, los Alpes europeos, Escandinavia y las altas montañas de Asia, fenómeno que estaría asociado al retroceso que están experimentando los glaciares del mundo en las últimas décadas producto del calentamiento atmosférico como un factor clave [2]. Los GLOF, según Richardson y Reynolds, son fenómenos complejos, asociados con otros eventos geodinámicos que causan que las morrenas inestables, que contienen las lagunas, estallen catastróficamente [5]. A nivel global, se tiene el registro de 1,348 inundaciones que se han dado a causa de glaciares a lo largo de diez siglos. Estas inundaciones se dieron en 20 países de los cuales, el mayor número de muertes fue registrado en la zona de Asia Central con 6,300 víctimas, además de afectar infraestructura de comunicaciones y actividades agro-pastoriles de subsistencia al convertir fértiles tierras de cultivo y praderas, en improductivos campos de arena y escombros [6]. Por otro lado, Nepal, India y Perú fueron los países que experimentaron menos inundaciones, pero con un mayor nivel de daño [4].

Un excelente indicador de la evolución del clima son los glaciares tropicales debido a su alta sensibilidad a los cambios en la temperatura, precipitación y radiación [7], siendo especialmente más afectados por el cambio climático en relación con otros tipos de glaciares en el mundo [8]. Según el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), el Perú cuenta con el 71% de los glaciares tropicales del planeta y ha perdido 1,284 km² de su superficie, alrededor del 53.6%, entre los años 1962 y 2016 [9]. La misma institución reportó que en el Perú existe un total de 8,577 lagunas de origen glaciar con una superficie de 1,022 km² [10]. Estos cuerpos de agua serían recargados de manera directa

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

por la precipitación, así como por la escorrentía y el derretimiento de glaciares [8]. Cabe mencionar que, en el Perú, la Cordillera Blanca, ubicada en el departamento de Ancash, abarca el 25% de los glaciares tropicales a nivel mundial y el 43% de la superficie glaciar en el país [8].

La Cordillera Blanca anualmente registra un retroceso cercano a los 19 metros en promedio de sus nevados [11], donde según Ahmed et al., han ocurrido 28 eventos GLOF entre 1702 y 2020, los cuales provocaron la devastación de las poblaciones asentadas en los alrededores de las lagunas glaciares, o curso abajo de las quebradas y ríos que drenan sus aguas [12]. Tal es el caso de la laguna Palcacocha, ubicada en la Cordillera Blanca, donde el 13 de diciembre de 1941 se ocasionó un aluvión de gran magnitud por el desprendimiento de un bloque de hielo del glaciar Palcaraju [13] que generó un desembalse y ruptura del dique natural de la laguna [14]. El GLOF provocado por la laguna Palcacocha destruyó casi la tercera parte de la ciudad de Huaraz [15] y causó la muerte de al menos 1600 personas [14]. Según la Autoridad Nacional del Agua de Perú (ANA), desde 1974 a 2016, el volumen de la laguna aumentó aproximadamente en 34 veces, fenómeno que es asociado al retroceso glaciar de los nevados ubicados en sus alrededores [14], razón por la cual, para controlar el volumen de agua de la laguna y reducir el riesgo de un posible desembalse, el 05 de mayo de 2012 se inició la operación del sistema de sifonaje con 6 tubos [16], al que se agregaron 4 sifones más para el año 2016 [17].

En décadas pasadas, el trabajo de monitoreo, evaluación e investigación de glaciares y lagunas de origen glaciar se hacía exclusivamente con mediciones en campo, que al ser en la mayoría de los casos lugares de difícil de acceso, con condiciones meteorológicas extremas, y donde, generalmente, se requiere de licencias gubernamentales para el ingreso, eran actividades altamente costosas que limitaban su realización [18]. Sin embargo, en la actualidad el monitoreo y procesamiento de metadatos obtenidos de imágenes satelitales multiespectrales, como las capturadas por satélites LANDSAT, se han convertido en una opción más accesible para evaluar y realizar el seguimiento del estado de glaciares y lagunas glaciares a través del software GIS y la aplicación de algoritmos informáticos, como el cálculo del Índice diferencial de agua normalizado (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) [19].

En base a lo anterior, se estima que el incremento del área y volumen de las lagunas glaciares en nuestro país en las últimas décadas pone en riesgo a las poblaciones aledañas ante la creciente posibilidad de ocurrencia de GLOF. Este es el caso de la laguna Palcacocha, que representa una de las mayores amenazas que tienen los pobladores que habitan la ciudad de Huaraz, capital del departamento de Ancash, en los andes centrales de Perú, que, de ser afectada por un GLOF, los daños a su infraestructura y economía podrían ascender a más de S/ 700 millones [20]. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar las relaciones entre la variación de patrones climáticos en las estaciones meteorológicas cercanas y el área

superficial de la laguna Palcacocha, entre los años 1984 y 2022, calculada con imágenes satelitales, como un indicador de riesgo de GLOF.

B. MÉTODOS

Durante la investigación, se hizo la revisión documental con fuentes extraídas de las bases de datos de SCOPUS, *Web of Science*, entre otras, así como repositorios académicos e informes de entidades competentes como la ANA, Ministerio del Ambiente (MINAM), INAIGEM, tesis presentadas ante universidades peruanas y otros estudios que complementaron con información para el cumplimiento del objetivo del estudio. Asimismo, se identificaron los años en los que se produjo el ENOS, según el Instituto Geofísico del Perú, tipificado por su nivel de intensidad dentro del periodo de análisis [21].

A. Área de estudio

El área de estudio está constituida por la microcuenca de la laguna Palcacocha, ubicada en las coordenadas geográficas 9° 23' 41''S y 77° 22' 44''O, a una altura de 4,566 m s.n.m. en las faldas de los Nevados Palcaraju y Pucaranra de la Cordillera Blanca [14], distrito de Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash. Sus aguas provienen de la desglaciación de los nevados cercanos, escorrentías y precipitaciones directas [22], y es desaguada por la quebrada Cojup, contribuyente del río Quilcay, que atraviesa la ciudad de Huaraz a, aproximadamente, 20 kilómetros al S.O. de la laguna [23]. Según Frey et al., para el año 2016, tenía un volumen de 17'403,353 m³, una profundidad de 71 m, un ancho límite de 433 m y un largo límite de 1590 m [24].

B. Cálculo del área de la laguna y del glaciar con imágenes satelitales

La medición del área de la laguna Palcacocha, así como del glaciar ubicado al interior de su microcuenca, para cada año se realizó con imágenes satelitales multiespectrales Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI-TIRS, obtenidas de la plataforma web GLOVIS del Servicio Geológico de Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS). Las imágenes seleccionadas fueron las que estaban libres de cobertura de nubes sobre el área de estudio y mostraban la menor área glaciar entre los meses de junio a noviembre de cada año dentro del periodo de análisis. Las escenas se procesaron en el software de código libre QGIS 3.x, mediante la extensión *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP). Además, para la identificación de superficies glaciares y de cuerpos de agua se aplicó el cálculo del NDWI con la "Calculadora ráster" del mencionado software, cuyos resultados permitieron la estimación del área de la laguna Palcacocha, y de los glaciares que la forman, mediante la aplicación de herramientas de geoprocésamiento.

C. Procesamiento de la data de estaciones meteorológicas.

Asimismo, se realizó el análisis de las condiciones meteorológicas presentes en el área de estudio para ser

comparadas con el crecimiento superficial de la laguna Palcacocha. Con ese fin, se utilizó data meteorológica disponible en la página web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), correspondiente al periodo 1984 - 2022. En ese sentido, se descargaron datos de la estación meteorológica Recuay (9°43'45.31"S; 77°27'13.28"O; 3,431 m s.n.m.), por ser la más cercana al área de estudio y la única con data histórica de temperaturas disponible en la Cordillera Blanca y alrededores. Del mismo modo, se utilizaron datos de las estaciones meteorológicas de Milpo (9°53'3.68"S; 77°14'17.86"O; 4,350 m s.n.m.) y Anta (9°20'51.03"S; 77°35'59.23"O; 2,733 m s.n.m.), por tener data histórica de precipitaciones. Los datos fueron procesados en hojas de cálculo del software Microsoft Excel, mediante tablas dinámicas que fueron utilizadas para determinar precipitaciones anuales, así como temperaturas máximas, mínimas y medias, información que fue relacionada con la variación del área superficial de la laguna Palcacocha y del glaciar al interior del área de estudio. Finalmente, se obtuvieron datos de la variación de la temperatura media mundial de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de Norteamérica (*National Ocean and Atmospheric Administration - NOAA*) desde el año 1984 hasta el 2022 [25], como data complementaria para el mencionado análisis.

D. Cálculo del área de la laguna y temperatura del aire con Google Earth Engine

Para la validación de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de imágenes satelitales y de data meteorológica, mediante el software *Google Earth Engine*, se realizaron consultas del área superficial de la laguna Palcacocha, calculados automáticamente a partir de escenas Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 disponibles en web, para el periodo 2000 a 2021. Además, se utilizó el dataset *ERA5-Land Monthly Averaged* con el fin de extraer datos sobre los cambios de la temperatura del aire (a 2 metros del nivel de superficie) en el periodo 1984 - 2020 en el sector de la Laguna Palcacocha y alrededores.

C. RESULTADOS

Tras el procesamiento de las imágenes satelitales, se pudo observar la variación del área superficial de la laguna Palcacocha, que en 1984 (correspondiente a la primera escena Landsat 5 TM disponible del área de estudio) presentaba una extensión de 7.37 hectáreas, y para el 2022 se amplió a 49.28 hectáreas (**Figura 1**). El registro más bajo se presentó en el año 1986 con un área de 6.03 hectáreas y para el 2011 se incrementó en más de 8 veces esa extensión, al alcanzar su máximo registro con 51.2 hectáreas.

La evolución del área superficial de la laguna Palcacocha muestra 3 periodos claramente diferenciados: el primero de 1984 a 1996, en la que se registran valores bajos con pequeñas fluctuaciones con una varianza de 1.72; el segundo periodo parte de 1997 al mostrar una rápida y constante expansión hasta

alcanzar su máximo valor en 2011, con una varianza de 224.15; y finalmente un tercer periodo entre 2012 y 2022 en el que se aprecia un pequeño descenso en el área de la laguna con algunos picos aislados en los años 2016, 2019 y 2022, con una varianza de 2.56.

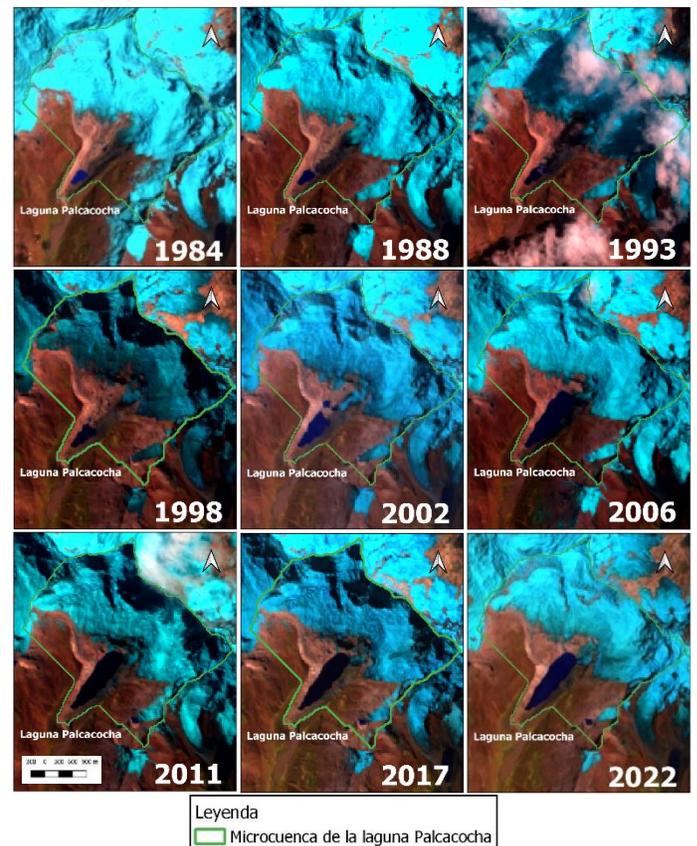


Fig. 1: Evolución de la laguna Palcacocha y glaciares del área de estudio de 1984 a 2022.

Entre los años 1984 y 1994, se observa que la variación en el área de la laguna es marginal, teniendo un promedio de cambio anual negativo o de reducción de 0.001 hectáreas y una variación media de 1.7%. Sin embargo, este patrón cambia en el periodo siguiente (1994-1995) presentado una secuencia de resultados positivos (incremento del área) ininterrumpidos hasta el año 2011 (17 años) sumando una expansión total de 45 hectáreas, con un promedio de expansión anual de 2.64 hectáreas y una variación media de 14%. Finalmente, de 2011 a 2022 nuevamente se presenta un comportamiento similar al patrón inicial de alternancia de pequeños decrementos con leves incrementos con un promedio anual de pérdida de área de 0.17 hectáreas y una variación media anual de 0.2%.

Por otro lado, el área cubierta de glaciares en la microcuenca de la laguna Palcacocha, muestra una variación en forma de ciclos de tendencia decreciente, mostrando años de expansión (1986, 1992, 2000, 2008, 2012, 2015, 2019), seguidos de años con reducción en su superficie. Su máxima extensión se presentó en el año 1992 con 778.8 hectáreas,

mientras que su valor mínimo se produjo el año 2022, registrando una extensión de 635.9 hectáreas (**Figura 2**).

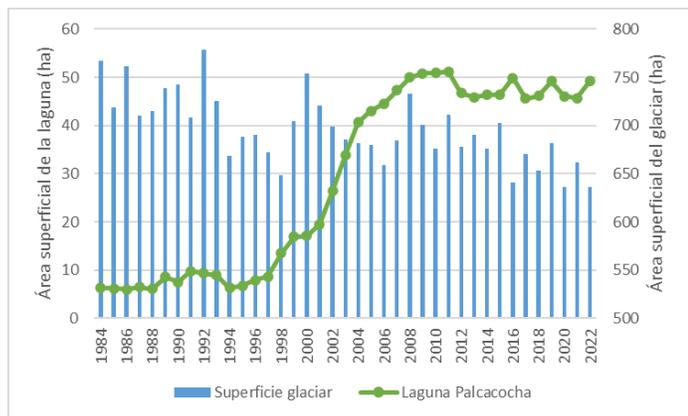


Fig. 2: Comparativo entre evolución de la extensión de la laguna Palcacocha y la extensión de los glaciares en el área de estudio.

En el caso de las temperaturas, la data de la estación meteorológica de Recuay muestra una tendencia incremental en el promedio de temperatura mínima anual a lo largo del periodo 1984 – 2022, mientras que en las temperaturas media y máxima no se logra apreciar una variación significativa en sus respectivas líneas de tendencia (**Figura 3**). Asimismo, se observa valores de temperatura fuertemente elevados para el año 2016, que se asume corresponden a posibles registros errados por falla de los sensores de la estación meteorológica automática, como se evidenció en el caso de los datos de 2017 al contrastar con data de la estación convencional de la misma localidad, permitiendo su corrección.

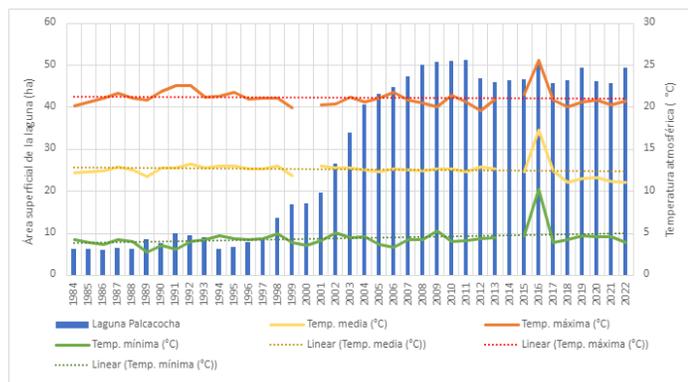


Fig. 3: Comparativo entre evolución de la extensión de la laguna Palcacocha y el promedio anual de temperaturas de la estación meteorológica Recuay.

Las precipitaciones en la estación Recuay muestran una ligera tendencia decreciente, posiblemente afectada por la data incompleta de algunos años como 2013 y 2015, mostrando claramente ciclos de años húmedos seguidos de años más secos. Sin embargo, al analizar los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de Milpo y Anta, se aprecian claras

tendencias al incremento durante los años en las que operaron dentro de nuestro periodo de análisis (**Figura 4**).

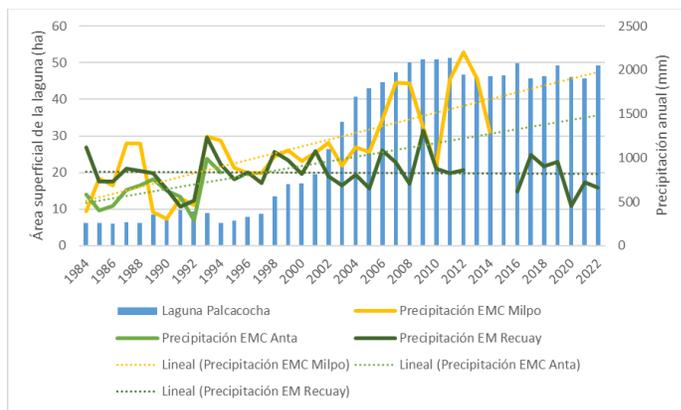


Fig. 4: Comparativo entre la extensión de la laguna Palcacocha y la precipitación anual de las estaciones meteorológicas Anta, Milpo y Recuay.

Al correlacionar el área de la laguna Palcacocha con las temperaturas y precipitaciones de las estaciones meteorológicas, se evidencian valores bajos de relación con las temperaturas ($R^2 > 0.11$), al igual que con el registro de precipitaciones anuales de las estaciones de Recuay y Anta (**Tabla I**). Sin embargo, se aprecia que la relación es más fuerte entre los registros de precipitaciones anuales de la estación de Milpo con el área que presentó la laguna a lo largo de todo el periodo de análisis ($R^2 = 0.5067$).

TABLA I:
REGRESIÓN RESULTANTE DE LA CORRELACIÓN DEL ÁREA DE LA LAGUNA PALCACOCHA Y VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Estación meteorológica	Precipitaciones	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima
RECUAY	0.0085	0.0034	0.0021	0.1052
MILPO	0.5067	-	-	-
ANTA	0.0623	-	-	-

Al correlacionar el área glaciar que se tuvo en cada año dentro del área de estudio, con las temperaturas y precipitaciones de las estaciones meteorológicas, se evidencian valores bajos de relación con las temperaturas ($R^2 > 0.15$), al igual que con el registro de precipitaciones anuales de la estación Recuay, elevándose ligeramente en el caso de las precipitaciones registradas en las estaciones de Milpo y Anta (**Tabla II**).

Como mecanismo de validación de resultados, se plotearon los valores de temperatura que reporta ERA5-Land Monthly Averaged a masas de aire a 2 metros de la superficie correspondiente a la ubicación de la laguna Palcacocha, observándose una tendencia incremental de aproximadamente $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre 1984 y 2020, que coincide con el incremento de la extensión de la laguna. Sin embargo, al ejecutar la correlación entre ambas variables se obtuvo un valor de regresión bajo ($R^2 = 0.1388$).

TABLA II:
REGRESIÓN RESULTANTE DE LA CORRELACIÓN DEL ÁREA GLACIAR Y
VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Estación meteorológica	Precipitaciones	Temperatura media	Temperatura máxima	Temperatura mínima
RECUAY	0.0013	0.0012	0.0059	0.1451
MILPO	0.1902	-	-	-
ANTA	0.2848	-	-	-

Por otra parte, durante nuestro periodo de análisis se registraron un total de 15 eventos ENOS (9 débiles, 4 moderados, 1 fuerte y 1 extraordinario) [21], mostrando, en 11 ocasiones, una expansión del área de la laguna Palcacocha en relación con el registro anterior (8 débiles, 1 moderado, 1 fuerte y 1 extraordinario), en tanto, los otros 4 registros presentaron un decremento en su área de la laguna (1 débil y 3 moderados). Además, se estimó que el promedio de expansión para los periodos que presentó el ENOS débil fue de 2.41 ha/año y para los eventos fuertes y extraordinarios 2.66 ha/año. En cambio, para los ENOS moderados se estimó un promedio de reducción del área de la laguna de 1.64 hectáreas al año [21].

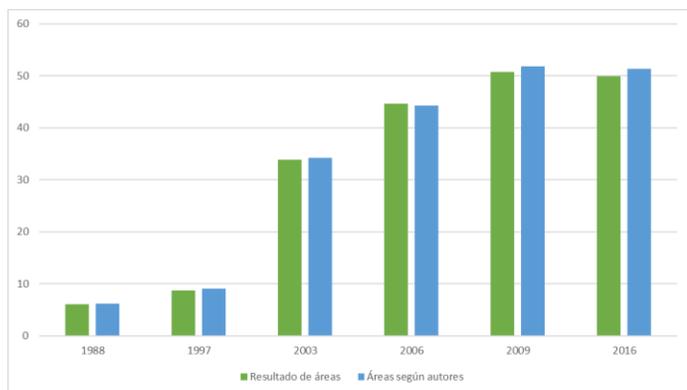


Fig. 5: Comparativo de los resultados del área de la laguna Palcacocha y datos de otras fuentes.

Para validar los resultados obtenidos a partir del procesamiento de imágenes satelitales con el método del NDWI, comparamos nuestros hallazgos con reportes de otras fuentes (Figura 5), observando lo siguiente: para 1988, Palomino reportó un área de 6.19 hectáreas [18], que frente a nuestro resultado de 6.11 hectáreas para ese año, muestra una diferencia de 1.3%; para 1997, el mismo autor reportaba 9.05 hectáreas [18], que comparado con las 8.65 hectáreas que se calculó, muestra un error máximo de 2.4%; para el 2003, la ANA reporta un espejo de agua de 342,332 m² [15], que frente a las 33.81 hectáreas estimadas, tiene una variación de 1.2%; Palomino precisa que para 2006, el área de la laguna era de 44,34 hectáreas [18], siendo nuestro resultado 44.6 hectáreas con un error de 0.6%; al 2009 la ANA informaba que la superficie de la laguna era de 518,425.85 m², que al compararlo con nuestro resultado de 50.81 hectáreas, muestran una diferencia de 2% [15]; finalmente, la ANA para 2016 reportaba

un área de espejo de agua de 514,157.38 m² [15], que frente a las 49.91 hectáreas estimadas en nuestro análisis, presentan un error máximo de 2.9%.

D. DISCUSIÓN

Los resultados muestran un claro incremento en el área superficial de la laguna Palcacocha, que dentro del periodo de análisis alcanzó a multiplicarse en más de 8 veces el área que tenía entre su menor registro en 1986 (6.03 hectáreas) y el año en el que tuvo su mayor extensión en 2011 (51.2 hectáreas), lo que implica un aumento significativo del volumen de agua que contiene y el riesgo de provocar un GLOF que afecte a las poblaciones asentadas aguas abajo. Asimismo, en el caso de los glaciares presentes al interior del área de estudio, han mostrado una tendencia decreciente desde 1984, presentando en 2022 su registro más bajo con 635.9 hectáreas, que representa una disminución del 18.4% (142.9 hectáreas) de la superficie glaciar que tuvo en 1992 (año con mayor extensión) con 778.8 hectáreas.

La evolución del área de la laguna Palcacocha estaría relacionada directamente con el incremento de la temperatura media a nivel mundial, mostrando una fuerte correlación entre ambas variables ($R^2 = 0.747$); ello evidencia que sería el principal factor del cambio en la dinámica de almacenamiento que tiene la laguna (Figura 6). Para el caso de la pérdida de masa glaciar en la microcuenca de la laguna Palcacocha, muestra una relación ligeramente más baja con el incremento de la temperatura media a nivel mundial ($R^2 = 0.505$), pero también indicaría que es un importante impulsor de retroceso glaciar en el área de estudio. A partir del año 2012 hacia adelante, el descenso en el área de la laguna y su relativa estabilidad se daría porque desde ese año opera el sistema de sifones instalados como medida de prevención ante un posible desborde. En ese sentido, la laguna estaría siendo manejada como una presa, donde las instituciones competentes controlan el volumen de agua que contiene, activando el sistema de drenaje cuando esta se aproxima a su nivel máximo de capacidad. Asimismo, el MINAM indica que el proceso de sifonaje y una mayor presencia de cobertura de nubes en la Cordillera Blanca (que reduce el derretimiento del hielo), permitiría disminuir el área de la laguna Palcacocha y mantener estables sus condiciones [26]. Todo ello, explicaría porqué a partir del año 2012 ya no hay un aumento significativo en el área de la laguna y mantiene una extensión regulada entre 45.6 y 49.9 hectáreas, aproximadamente.

Con respecto a la muy baja relación entre las precipitaciones anuales y las temperaturas promedio de la estación meteorológica Recuay (ubicada en el valle del río Santa) con el incremento anual del área de la laguna Palcacocha ($0.002 < R^2 < 0.106$), se debería a que a pesar de estar en la misma vertiente de la Cordillera Blanca, se ubican a una distancia de, aproximadamente, 37 kilómetros entre sí, en pisos altitudinales y fisiografías diferentes, presentando climas distintos, lo que genera que sus temperaturas y precipitaciones

tengan patrones diferentes de ocurrencia a lo largo del tiempo. Ello explicaría porqué el valor de correlación entre el área de la laguna y la precipitación en la estación meteorológica de Milpo tiene una relación más fuerte ($R^2 = 0.4975$), al estar ubicada en la misma vertiente de la cordillera y a una altura similar a la de la laguna Palcacocha, por lo que estarían sometidas a condiciones atmosféricas similares.

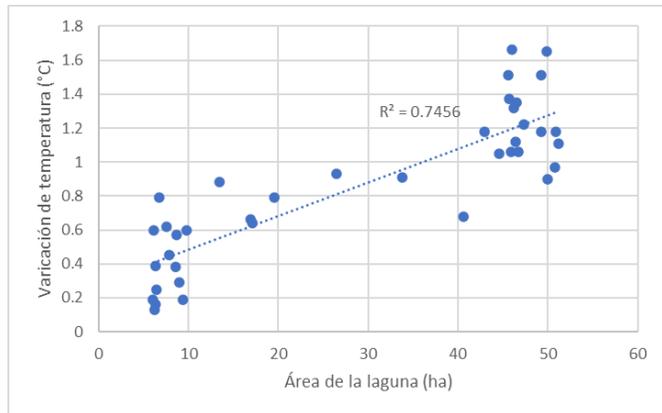


Fig. 6: Correlación de la extensión de la laguna Palcacocha y la variación de temperatura media mundial según NOAA.

Un suceso que se considera habría sido clave en este proceso, es la ocurrencia del ENOS extraordinario de 1997–1998, porque representó el primer periodo anual con un crecimiento fuerte de la laguna Palcacocha (4.84 hectáreas), que habría sido producido por el incremento de las temperaturas (especialmente la mínima), y la abundante precipitación, que, asociada a la mayor temperatura, habría sido predominantemente líquida, factores que en su conjunto pudieron impulsar una mayor pérdida glaciaria en relación a los años anteriores, marcando una tendencia que solo se pudo revertir con la implementación del sistema de sifonaje en 2012. Sin embargo, llama la atención que, a pesar del sistema de control implementado en la laguna en 2012, en años posteriores se hayan presentado incrementos significativos como en los años 2016, 2019 y 2022. En el primer caso, se observa que coincide con el periodo de ocurrencia del ENOS 2015-2016, de fuerte magnitud [27], que, según Martínez et al., fue uno de los más intensos registrados desde 1950 por altos valores de temperatura que mostró, y que pudo tener un efecto parecido al que generó en ENOS de 1997-1998 sobre el aporte de agua a la laguna Palcacocha [27].

Es importante precisar que la ocurrencia de un GLOF no debe ser atribuido únicamente al calentamiento global, sino que depende de diversos procesos geodinámicos, variabilidad atmosférica y evolución de los glaciares de la zona, como lo demuestra el GLOF que afectó la ciudad de Huaraz en 1941, cuando no se presentaba el acelerado incremento de la temperatura que se tiene en la actualidad por efecto del cambio climático. Asimismo, la laguna Palcacocha alcanzó un área similar en el 2003 (34.3 hectáreas) al que tenía en 1941 previo al aluvión (30.3 hectáreas y 12.9 millones m³) [13], por lo que

se deduce que el área superficial no es el único factor que desencadenaría un GLOF, sino que influyen otros factores como la profundidad de la laguna, la elevación de su espejo de agua, la estabilidad de la morrena o dique que lo contenga, entre otros.

Finalmente, en función de nuestros resultados y ejercicios de validación con datos aportados por otras fuentes, se puede afirmar que la técnica del NDWI aplicada a imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI-TIRS, a pesar de tener una resolución de origen de 30 metros de lado por pixel (de resolución media), es bastante precisa considerando que el error promedio apenas alcanza los 1.74% comparado con los otros reportes, con un valor máximo de diferencia que no supera el 2.93%.

E. CONCLUSIONES

El área de la laguna Palcacocha tiene una fuerte relación con la variación de la temperatura media mundial, que sería el factor que impulsa el derretimiento de los glaciares Palcaraju y Pucaranra que la abastecen de agua. Asimismo, se determinó que los años en los que ocurre un ENOS de fuerte intensidad, el área de la laguna presenta una expansión atípica, debido al incremento de la temperatura, además de la ocurrencia de precipitaciones en su mayoría líquidas, que aceleraron la pérdida de masa glaciaria.

El uso de imágenes satelitales multiespectrales mediante su procesamiento automatizado y la aplicación del algoritmo NDWI, para la identificación, medición y monitoreo de glaciares y cuerpos de agua, mostró resultados de alta precisión y confiabilidad con un error menor al 3%, respecto a reportes de otros autores e instituciones que estudiaron el caso, por lo que se debería promover su uso en este tipo de evaluaciones.

Desde el año 2012, la laguna se encuentra administrada por un sistema de sifonaje para la regulación del volumen de agua que contiene, reduciendo el riesgo de colapso. Sin embargo, por el actual debilitamiento de los glaciares, producto del calentamiento global, se podría generar la caída de fragmentos de hielo desde los nevados adyacentes que provoquen un GLOF y podría afectar nuevamente a la ciudad de Huaraz; por lo tanto, se debe estudiar la estabilidad de los glaciares Palcaraju y Pucaranra, así como la implementación de nuevos mecanismos que contengan este tipo de peligras.

Limitaciones:

No se cuenta con data meteorológica, en plataformas web, de temperaturas de estaciones ubicadas en el ámbito de la Cordillera Blanca por encima de los 4,000 m s.n.m.

REFERENCIAS

- [1] D. H. Shugar *et al.*, "Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990," *Nature Climate Change* 2020 10:10, vol. 10, no. 10, pp. 939–945, Aug. 2020, doi: 10.1038/s41558-020-0855-4.
- [2] G. Veh, N. Lützow, V. Kharlamova, D. Petrakov, R. Hugonnet, and O. Korup, "Trends, Breaks, and Biases in the Frequency of Reported

- Glacier Lake Outburst Floods,” *Earths Future*, vol. 10, no. 3, p. e2021EF002426, Mar. 2022, doi: 10.1029/2021EF002426.
- [3] M. Somos-Valenzuela, R. Chisolm, D. McKinney, and D. Rivas, “Inundation modeling of a potential glacial lake outburst flood in Huaraz, Peru,” *Technical (Online) Report - University of Texas at Austin, Center for Research in Water Resources*, vol. 14, no. 1, pp. 1–72, 2014, [Online]. Available: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/27738>
- [4] J. L. Carrivick and F. S. Tweed, “A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods,” *Glob Planet Change*, vol. 144, pp. 1–16, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.GLOPLACHA.2016.07.001.
- [5] S. D. Richardson and J. M. Reynolds, “An overview of glacial hazards in the Himalayas,” *Quaternary International*, vol. 65–66, pp. 31–47, Apr. 2000, doi: 10.1016/S1040-6182(99)00035-X.
- [6] D. R. Gurung *et al.*, “Lemthang Tsho glacial Lake outburst flood (GLOF) in Bhutan: cause and impact,” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 4, no. 1, p. 17, Dec. 2017, doi: 10.1186/s40677-017-0080-2.
- [7] B. Pouyaud, B. Francou, P. Chevallier, and P. Ribstein, “Contribución del programa «nieves y glaciares tropicales» (NGT) al conocimiento de la variabilidad climática en los Andes,” 1997, [Online]. Available: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010056892>
- [8] A. A. Yap Arévalo, “Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GLOFs,” Sep. 2015, [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7268>
- [9] INAIGEM, “Las Cordilleras Glaciares del Perú,” 2018. <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2019/04/INVENTARIO-NACIONAL-DE-GLACIARES--LAS-CORDILLERAS-GLACIARES-DEL-PER%C3%9A.pdf>
- [10] INAIGEM, “Boletín Hidrometeorológico 2020-2021,” 2021. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/14083_boletin-hidrometeorologico-2020-2021.pdf
- [11] Actualidad Ambiental, “Cambio climático: Perú perdió el 51% de sus glaciares en los últimos 50 años | SPDA Actualidad Ambiental,” 2020. <https://www.actualidadambiental.pe/cambio-climatico-peru-perdio-el-51-de-sus-glaciares-en-los-ultimos-50-anos/>
- [12] R. Ahmed *et al.*, “Expansion of Moraine-Dammed Glacial Lakes and Historical GLOF Events in Cordillera Blanca Region of Peruvian Andes,” *Earth Systems and Environment*, vol. 7, no. 1, pp. 131–150, Jan. 2023, doi: 10.1007/S41748-022-00330-0/TABLES/4.
- [13] R. F. Stuart-Smith, G. H. Roe, S. Li, and M. R. Allen, “Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat,” *Nat Geosci*, vol. 14, no. 2, pp. 85–90, Feb. 2021, doi: 10.1038/S41561-021-00686-4.
- [14] M. Mergili, S. P. Pudasaini, A. Emmer, J. T. Fischer, A. Cochachin, and H. Frey, “Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru),” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 24, no. 1, pp. 93–114, Jan. 2020, doi: 10.5194/HESS-24-93-2020.
- [15] ANA, “La historia tras la laguna Palcacocha,” *Autoridad Nacional del Agua*, 2017, [Online]. Available: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2433>
- [16] INDECI, “Peligro por aluvión en el departamento de Ancash,” 2012. http://sinpad.indeci.gob.pe/UploadPortalSINPAD/COEN_Noticia/INFORME%20DE%20PELIGRO%20N%C2%BA%20005%20-%2014SET2012%20-%20PELIGRO%20POR%20ALUVI%C3%93N%20EN%20LAGUNA%20PALPACOCCHA%20-%20ANCASH...pdf
- [17] INAIGEM, “Informe técnico de la situación actual de la laguna glaciaria Palcacocha,” 2016, [Online]. Available: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/server/api/core/bitstreams/79ba9878-ebab-47d2-803d-2c561ee5663b/content>
- [18] M. Palomino, “Análisis multitemporal del sector sur del Parque Nacional Huascarán utilizando imágenes del sensor TM Landsat 5,” 2013, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.21503/cyd.v16i1.1117>
- [19] B. C. Gao, “NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space,” *Remote Sens Environ*, vol. 58, no. 3, pp. 257–266, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- [20] INAIGEM, “Evaluación del riesgo por aluvión en la ciudad de Huaraz, distritos de Huaraz e Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash,” Huaraz, Dec. 2020.
- [21] IGP, “El Niño/La Niña Costeros.” http://met.igp.gob.pe/el_nino/lista_eventos.html
- [22] Valderrama P, Pari W, Silva C, and Fidel L, “Evaluación ingeniero-geológico: Laguna de Palcacocha y su influencia en la ciudad de Huaraz Cordillera Blanca. Región Ancash,” 2013.
- [23] el Ferrol, “Huaraz: Instalarán Sistema de Alerta Temprana en laguna Palcacocha,” 2019. <https://www.elferrolchimbote.com/index.php/tecnologia/293-huaraz-instalaran-sistema-de-alerta-temprana-en-laguna-palcacocha> (accessed Feb. 07, 2023).
- [24] H. Frey *et al.*, “Multi-Source Glacial Lake Outburst Flood Hazard Assessment and Mapping for Huaraz, Cordillera Blanca, Peru,” *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 6, p. 210, Nov. 2018, doi: 10.3389/FEART.2018.00210/BIBTEX.
- [25] NOAA, “Climate at a Glance Global Time Series,” *National Centers for Environmental Information*, 2023. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land/ytd/12/1880-2021>
- [26] MINAM, “INAIGEM inspecciona 20 lagunas peligrosas en Ancash y monitorea Palcacocha de manera continua,” 2017. <https://sinia.minam.gob.pe/novedades/inaigem-inspecciona-20-lagunas-peligrosas-ancash-monitorea-palcacocha>
- [27] Martínez R, Zambrano E, Nieto J, Hernández J, and Costa F, “Evolución, vulnerabilidad e impactos económicos y sociales de El Niño 2015-2016 en América Latina.” 2017.