ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1729

Influence of temperature and precipitation on the glacier retreat of the Cordillera Blanca, 1990-2022, Ancash

Resumen *– La disminución de los glaciares puede tener consecuencias adversas ante la disponibilidad de agua, así como en la generación de energía, en la agricultura y la economía, por lo que es importante monitorear constantemente estos recursos. El objetivo del presente estudio fue determinar la influencia de la temperatura y precipitación en el retroceso glaciar de los nevados de la Cordillera Blanca durante el periodo 1990-2022. Se utilizó un estudio de tipo descriptivo – explicativo y diseño longitudinal no experimental; la técnica aplicada fue la teledetección, aplicando el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), utilizando imágenes Landsat 5 y 8 de USGS Earth Explorer, y datos climáticos de NASA POWER. Los resultados mostraron que durante el periodo estudiado existe un retroceso glaciar constante a razón de 5.30 km²/año, provocando una pérdida de 28.58 % de masa glaciar en el periodo 1990-2022. La temperatura tuvo influencia estadística significativa ante este fenómeno, destacando la temperatura máxima con un incremento de 0.035 °C/año No se encontró influencia estadística significativa para la variable precipitación, aunque destaca la gran variabilidad de este factor posiblemente a causa de los efectos de los fenómenos de El Niño y La Niña.*

Palabras clave-- Retroceso glaciar, temperatura, precipitación, teledetección

I. Introducción

El 68.00 % de los glaciares tropicales del planeta se ubican en Perú [1]. Como consecuencia del cambio climático, durante las últimas cinco décadas, el país ha perdido el 51.00 % de su superficie glaciar, mientras que en los últimos 30 años se calcula una pérdida del 22.00 % [2]. Asimismo, se estima que las masas glaciares por debajo de los 5 000 m s.n.m. podrían desaparecer dentro de 10 años, pues algunas ya habrían perdido más del 90.00 % de su superficie glaciar [3].

El retroceso glaciar tiene consecuencias directamente relacionadas con la disponibilidad de agua y el bienestar de la población a nivel nacional y global. Los glaciares suministran el 26.00 % de agua para la superficie sembrada en las montañas y el 68.00 % para la costa; además, son los principales reservorios de agua dulce [3].

El retroceso glaciar se refiere a la disminución de la extensión de los glaciares, lo que tiene consecuencias significativas no sólo en el ambiente, sino también en las comunidades que dependen de ellos. En el ámbito socioeconómico afecta a la disponibilidad de agua para consumo humano; de igual manera, la disminución del agua de deshielo afecta la productividad agrícola, especialmente en cultivos que dependen de sistemas de riego tradicionales, lo que puede provocar inseguridad alimentaria [4]; asimismo, la pérdida de glaciares puede reducir el atractivo de la región, afectando la economía local basada en el turismo [5].

Este fenómeno también ha intensificado los riesgos de desastres naturales, tales como aluviones, desbordes de lagunas glaciares y deslizamientos, poniendo en peligro no solo vidas humanas, sino también infraestructuras críticas como caminos rurales, sistemas de irrigación y centros poblados [4].

En el ámbito ambiental, la desaparición de glaciares afecta los ecosistemas de alta montaña, modificando la biodiversidad y la disponibilidad de hábitats para especies adaptadas a condiciones frías; por otro lado, puede aumentar la frecuencia de deslizamientos de tierra y avalanchas, poniendo en riesgo a las comunidades cercanas [4].

El aumento de temperatura ya habría extinguido las cordilleras Barroso y Volcánico, por lo que, actualmente, el Perú posee 18 cordilleras que presentan nevados de distintas extensiones [2]. Estos son indicadores del constante aumento de la temperatura debido a que los cambios climáticos a causa del calentamiento global los afectan rápidamente. El retroceso glaciar ha provocado cambios significativos en la dirección de flujo de los glaciares. Anteriormente, los glaciares se movían en una dirección determinada, lo que influía en la distribución de agua. Sin embargo, con el retroceso glaciar, la dirección de flujo de los glaciares ha cambiado, pudiendo alterar el equilibrio hidrológico en las zonas.

Una de las tres cordilleras más importantes del Perú es la Cordillera Blanca [6] del departamento de Ancash, que posee una extensión de 723.40 km^2; a su vez, es la que más glaciares ha venido perdiendo con una cantidad de 169 glaciares. Esta cordillera tiene un promedio de retroceso anual de 19 m [2].

Se estima que la Cordillera Blanca, que contiene además al nevado Huascarán, desaparecería en el año 2111; sin embargo, cordilleras como Chonta, La Viuda y Huanzo desaparecerían con mayor prontitud en esta década y un total de nueve cordilleras tendrían el mismo destino en un periodo de dos décadas. En la cordillera Vilcanota se puede encontrar el glaciar Quelccaya, que era considerado el glaciar tropical más grande a nivel mundial; pero entre 1976 y 2020, ha perdido su superficie de hielo en un 46.00 % [1].

Los daños hacia los glaciares son irreversibles, y como principales causantes de estas pérdidas se tienen el incremento de la temperatura y el cambio climático [2]. Actualmente, la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, se encarga del monitoreo y la cuantificación de los glaciares y lagunas altoandinas, así como de su evolución. De este modo, estas medidas ayudan a prevenir riesgos hacia la comunidad y a prever desastres naturales, como también a velar por el recurso hídrico.

Debido a su ubicación, que incluye áreas que son de difícil acceso y altitudes superiores a los 4 000 m s.n.m., las herramientas tecnológicas como la teledetección cumplen un importante rol al permitir cuantificar cambios espaciales y temporales en estos nevados.

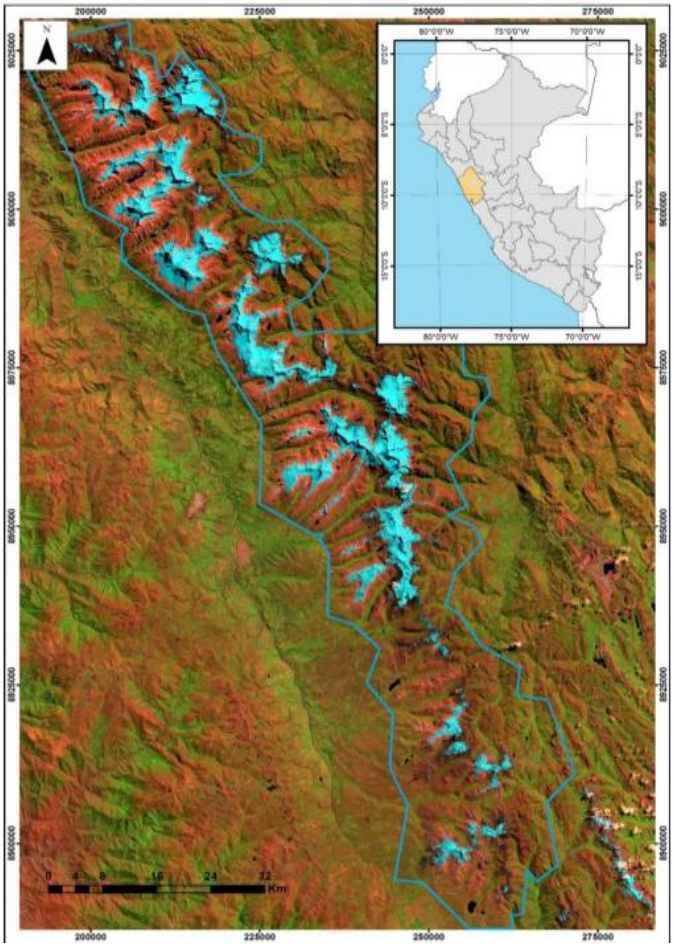

Fig 1. Mapa de ubicación de la Cordillera Blanca – Ancash.

II. METODOLOGÍA

El estudio es de tipo descriptivo y nivel explicativo, ya que busca exponer el motivo de que suceda un fenómeno y las condiciones en que se manifiesta o cómo está influenciado por una o más variables [7]. Así, se pretende explicar el cambio temporal de las superficies glaciares en la Cordillera Blanca y la influencia de la precipitación y temperatura en este proceso.

El diseño es longitudinal no experimental, pues las variables no son controladas ni manipuladas, sino que se observan y analizan en función del tiempo. En este sentido, el periodo de estudio abarca desde 1990 hasta 2022 [7]. Por último, la investigación es de enfoque cuantitativo, pues las variables son medidas expresadas numéricamente.

La población del presente estudio comprende los nevados de la Cordillera Blanca de la unidad política administrativa de la región Ancash. Con base al muestreo probabilístico por conveniencia, se consideró como muestra el 100 % de los nevados, con una superficie aproximada de 723.40 km² [6].

Para cada imagen satelital utilizada se aplicó la técnica de observación directa no experimental, que consiste en el uso de la percepción visual para la descarga de imágenes satelitales Landsat 5 y 8, con mínimo grado de nubosidad.

Como instrumento se utilizaron fichas de registro para las imágenes satelitales, variables de clima (temperatura y precipitación) y la variabilidad de la superficie glaciar en el periodo 1990 - 2022.

Por último, el procesamiento de datos espaciales se realizó con los programas ENVI 5.3 y ArcGIS 10.8, mientras que los análisis estadísticos se llevaron a cabo con Microsoft Excel y SPSS Estatistics 27.

El procedimiento se ha realizado como indica la Fig. 2.

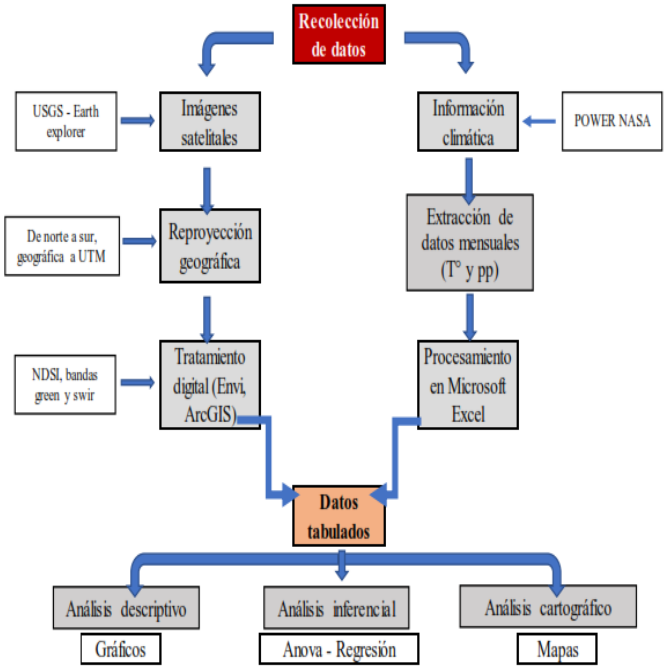

Fig. 2. Flujograma para la adquisición y análisis de datos.

A. *Recolección de imágenes satelitales e información cartográfica.*

Se utilizaron imágenes Landsat obtenidas de la plataforma oficial del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS); estas tienen una resolución espacial de 30 metros. Se consideraron las imágenes que están en el rango de colección 2 level 2, puesto que ya muestran una corrección atmosférica a nivel de superficie [8]. Asimismo, cada imagen seleccionada tuvo el menor porcentaje de nubosidad posible.

Las imágenes de Landsat 5 se encuentran disponibles hasta el año 2012; a partir de esta fecha hasta el 2022 se utilizaron las imágenes de Landsat 8. Fue necesario el uso de dos imágenes (Path/Row 008066 y 008067) por cada año de evaluación para abarcar la totalidad del área de interés.

B. Recolección de datos climáticos

La información de precipitación y temperatura se obtuvieron del portal NASA POWER (https://power.larc.nasa.gov), el cual presenta datos desde 1981 hasta la fecha.

C. *Preprocesamiento y determinación de NDSI*

La plataforma USGS brinda imágenes con correcciones atmosféricas y radiométricas a nivel de superficies; lo que significa que las reflectancias de interferencias que se generan por las nubes no están involucradas. Sólo fue necesario realizar la reproyección de hemisferio norte a sur mediante el software ENVI 5.3.

Cada banda de las imágenes fue cargada individualmente y se unieron mediante la herramienta **Layer Stacking**. Se realizó el mismo procedimiento con la imagen complementaria para luego realizar un mosaico con la herramienta **Seamless Mosaic**. Para poder realizar la combinación de bandas en el mosaico creado, fue necesario añadir los valores correspondientes a las longitudes de onda (Wavelength) por medio de la edición de metadata. Una vez que fue posible realizar la combinación de bandas, se procedió a utilizar la opción **Normalized Difference Snow Index**, que se encuentra en la herramienta Spectral Indices. Calculado el NDSI, se ajustaron los colores y contrastes según fuera necesario para una mejor interpretación, y se exportó el archivo en Shapefile para indicar la edición en ArcGIS. La edición en ArcGIS consistió en eliminar las zonas que no corresponden a la cobertura glaciar, apoyándose en la imagen satelital del año correspondiente. Por último, se unieron los polígonos para poder calcular el área en km^2.

D. *Determinación de precipitación y temperatura superficial*

La información de las variables precipitación y temperatura se descargaron en formato de Valores separados por comas (CSV) para ser organizados en Microsoft Excel mediante Tablas dinámicas, determinando los promedios de temperatura (°C/km^2) por cada año de estudio, así como la sumatoria en el caso de la precipitación (mm/km^2).

E. *Análisis de datos*

Se analizaron los datos obtenidos de cobertura glaciar, temperatura y precipitación, comprendidos en el periodo 1990-2022; de esta manera, el análisis estadístico estuvo basado en procesos descriptivos, inferencial y cartográfico.

• Proceso descriptivo: Se consideraron gráficos para presentar la tendencia promedio temporal durante el periodo evaluado. También se determinó el análisis descriptivo (media, moda, máximo, mínimo y rango) mediante el software SPSS Statistics 27.

• Proceso inferencial: Debido a que el número de muestra es inferior a 50 unidades, se utilizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, que permite conocer si existe o no distribución normal en las variables. Asimismo, se incluyó la prueba de ANOVA de una sola vía para conocer la influencia de los factores climáticos ante las variaciones de la masa glaciar de manera independiente, basándose en el p-valor (0.05) para determinar si existe influencia significativa entre dos variables. Este proceso se realizó mediante el SPSS Estatistics 27.

• Proceso cartográfico: Los cambios espaciales de cobertura glaciar se representaron mediante mapas, revelando las variaciones de incremento o descenso durante los años comprendidos entre el periodo 1998 - 2022. Esto se llevó a cabo mediante el software ArcGIS 10.8.

III. Resultados y Discusión

De acuerdo con los análisis de las imágenes satelitales, en el año 1990 la Cordillera Blanca presentaba un área glaciar de 593.45 km^2; mientras que en el año 2022 se calculó un área de 423.82 km^2, teniendo una pérdida de 169.63 km^2.

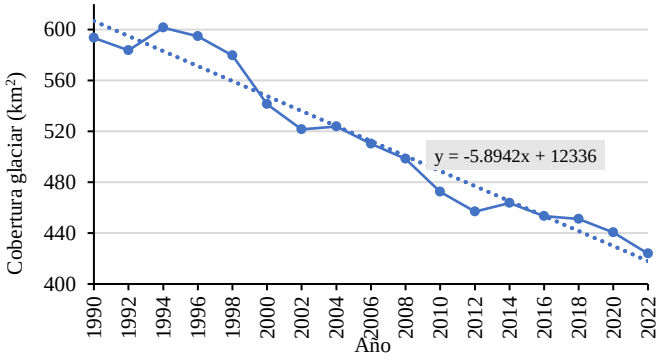

Fig. 3. Cobertura glaciar en la Cordillera Blanca, 1990-2022.

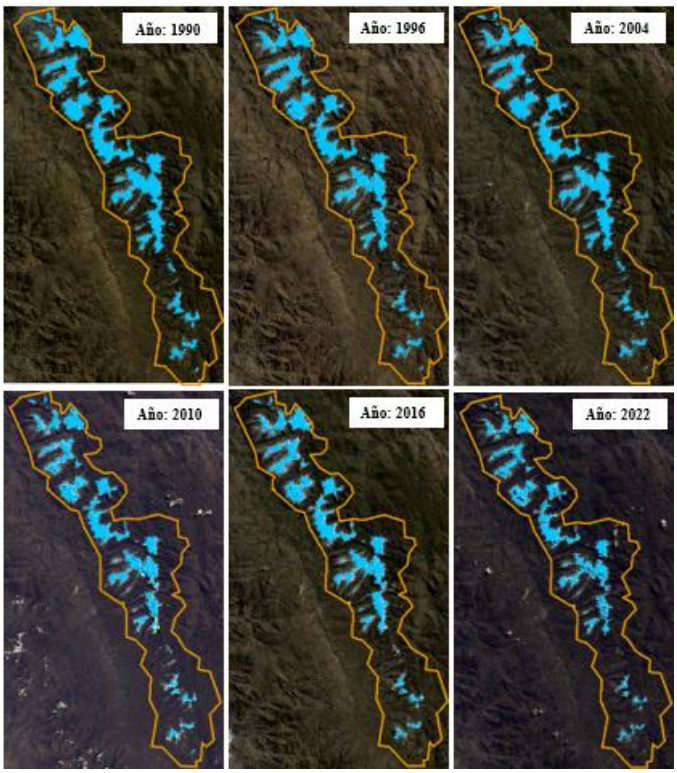

Fig. 4. Mapa temporal de cobertura glaciar en la Cordillera Blanca.

En la Fig. 4 se presentan los cambios espaciales de cobertura glaciar durante el periodo en estudio; es posible observar la pérdida de masa glaciar en todos los nevados.

El análisis de datos del retroceso glaciar de los nevados de la Cordillera Blanca durante el periodo 1990-2022, indica que existe un descenso promedio de 5.30 km²/año que se viene dando de manera constante. En este periodo se ha perdido el 28.58 % de cobertura glaciar, reduciéndose de 593.45 a 423.82 km^2. Esta cifra es mucho mayor a lo obtenido en diferentes investigaciones: en el nevado Chicón (Cusco) se reportó un descenso de 0.17 km²/año [9]; en el nevado Salluyo, en Puno, se calculó 0.45 km²/año [10]. Dentro de la región Ancash, se estimó que el nevado Huascarán tuvo una pérdida promedio de 0.47 km²/año [11]; mientras que en el Huaytapallana el descenso fue de 0.63 km²/año [12].

En el mismo sentido, se determinó que el nevado Ampay se redujo en un 57.98 % (de 2.38 a 1.00 km²) en el periodo 1985 – 2017 [13]; por su parte, el nevado Coropuna ha perdido 19.40 % (de 53.49 a 43.09 km²) de su masa glaciar durante el periodo 1987 – 2015 [14].

Los estudios mencionados coinciden en que existe una continua reducción en el área glaciar de cada nevado objeto de estudio. Sin embargo, la masa glaciar no sólo tiende a reducirse, sino que también existe periodos en que registra un aumento, pero de acuerdo con la información revisada y a los análisis del presente estudio, estos nunca alcanzaron el área inicial, lo que demuestra que el retroceso es progresivo y constante. Al respecto, otros autores proyectaron la cobertura glaciar hacia el año 2040, determinando que el nevado Salkantay tendrá 8.48 km² [12], y que el nevado Verónica definitivamente desaparecería [15].

De acuerdo con la Ref. [16], la pérdida de glaciares se ha acelerado desde la década de 1970. Los glaciares con una elevación inferior a 5 400 m s.n.m. vienen perdiendo masa a un ritmo doble que aquellos que superan esta altitud. Por su parte, la Ref. [17] señala que la cobertura compuesta por nieve es más vulnerable a la fusión que la masa de hielo, debido a la formación sólida y orden de las moléculas de agua por medio de los puentes de hidrógeno; es decir, en el hielo se presenta mayor cantidad de enlaces de puentes de hidrógeno, por lo que su resistencia a la fusión es mayor [18]. Asimismo, las coberturas compuestas por nieve generalmente se sitúan en altitudes bajas de una montaña glaciar [19].

La Ref. [20] ha detectado diminución de la cobertura glaciar entre los años 1996 y 2010, atribuyendo este escenario a la baja temperatura del ambiente litoral pacífico provocado por el fenómeno de la Niña, al igual que la Ref. [21]; esto provoca una disminución de vapor de agua en las nubes que es reflejado en el descenso de las precipitaciones. Sin embargo, es posible observar que los cambios formados por estos fenómenos temporales son también cambios de forma temporal.

Entre los años 1990 y 2009 se ha encontrado una aceleración en la recesión de la masa glaciar, con una tasa de reducción de 0.81 % por año [22]. En el mismo sentido, se ha reportado la pérdida del 27 % de área glaciar en la Cordillera Blanca durante el periodo 1970 – 2003.

En la Tabla N° 1 se presenta el análisis descriptivo de las variables en estudio. El área de cobertura glaciar presenta una media de 512.35 km^2, con un valor máximo de 601.45 km^2 y un mínimo de 423.82 km^2. Para la temperatura máxima se calculó una media de 15.76 ºC/km^2, un máximo de 17.11 ºC/km^2 y un mínimo de 14.19 ºC/km^2. Por su parte, la precipitación tiene una media de 842.42 mm/km^2, un valor máximo de 1073.64 mm/km^2 y un valor mínimo de 512.46 mm/km^2.

TABLA 1.
ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LAS VARIABLES EN ESTUDIO

Estadísticos	Precipitación (mm/km^2)	T_min (°C)	T_max (°C)	T_prom (°C)	Cobertura glaciar (km^2)
Media	842.42	2.97	15.76	9.36	512.35
Mediana	837.85	2.92	15.77	9.33	510.24
Desv. estándar	160.31	0.40	0.74	0.54	60.96
Rango	561.18	1.51	2.92	2.08	177.63
Mínimo	512.46	2.29	14.19	8.38	423.82
Máximo	1073.64	3.80	17.11	10.46	601.45

La Fig. 5 presenta la variación temporal de temperatura máxima, mínima y promedio, donde se calculan incrementos de 0.035 ºC/km²; 0.014 ºC/km² y 0.024 ºC/km², respectivamente, desde 1990 hasta el 2022. La mayor tendencia de crecimiento se dio en la temperatura máxima.

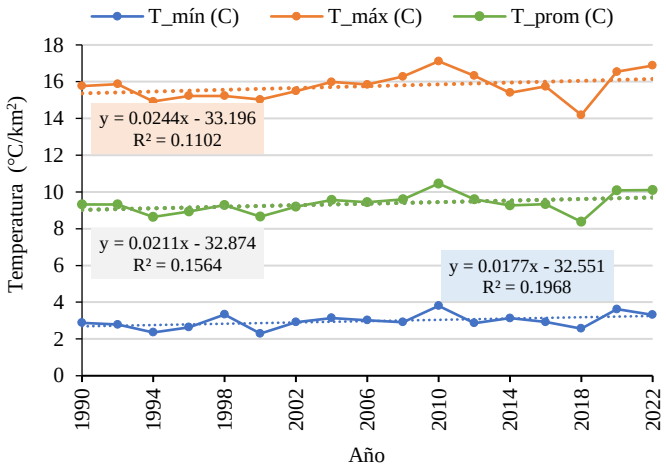

Fig. 5. Variación temporal de la temperatura.

La prueba de normalidad de Shapiro Wilk (Tabla N° 2) arroja p-valor mayor a 0.05 en cada variable, lo cual indica que estas presentan una distribución normal. A partir de este resultado es posible aplicar la prueba de ANOVA para medir la influencia entre la variable independiente y la variable dependiente.

TABLA 2
PRUEBA DE NORMALIDAD DE LAS VARIABLES

Variables	gl	p-valor	Interpretación
Cobertura glaciar	17	0.102	Distribución normal
Temperatura mínima	17	0.867	Distribución normal
Temperatura máxima	17	0.996	Distribución normal
Temperatura promedio	17	0.639	Distribución normal
Precipitación	17	0.575	Distribución normal

La prueba de ANOVA realizada a la temperatura máxima, indica que hubo influencia de cada variable respecto a la cobertura glaciar (Tabla N° 3), pues se ha obtenido un p-valor menor a 0.05.

TABLA 3
PRUEBA DE ANOVA PARA LA T° MAX.

ANOVA de un factor					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-valor
Entre grupos	1268.96	17	95.58	5.16	0.011
Dentro de grupos	0	0	35.48		
Total	1268.96	17			

En cuanto a la variable temperatura, el p-valor obtenido en el ANOVA es menor a 0.05, lo que indica que existe influencia estadística significativa sobre la cobertura glaciar; esto permite interpretar que mientras mayor sea el aumento en la temperatura, mayor será el retroceso glaciar. La Ref. [10] encontró que para el periodo 2000 – 2020, la temperatura máxima y mínima no tuvieron una tendencia significativa (a = 0.10). La Ref. [12] reportó que la variabilidad de la T° máxima en el Huaytapallana entre los años 1986 – 2022 fue de 0.072 ºC/km², demostrando que la correlación indica una asociación de -0.68, mientras que, en la temperatura mínima, con una variabilidad de 0.039 ºC/km², no se encontró correlación significativa.

Según los expertos sobre cambio climático IPCC, en las tres últimas décadas la superficie terrestre es más cálida comparado a los años precedentes a 1850 [14], lo cual permite mencionar que el comportamiento de las variables climáticas son efectos del calentamiento global, reforzando las conclusiones de que el cambio climático ha tenido incidencia significativa durante las últimas décadas [23].

Naturalmente, la variable climática que más influye en la variabilidad de la cobertura glaciar es la temperatura, y esto se debe a una asociación de proporcionalidad: mientras la temperatura del aire sea mayor, el flujo de calor turbulento también lo será, reflejándose en la pérdida de cobertura glaciar en forma de fusión líquida y en forma de desprendimiento de masa [24]. Este último fenómeno ocurre mayormente en las cumbres de montañas y laderas empinadas, a causa de que la temperatura llega a desestabilizar la estructura sólida del glaciar [25]. De acuerdo a la Ref. [26], la superficie lagunar de la Cordillera Blanca alcanzó 11.50 km², lo que refleja directamente la pérdida de cobertura glaciar.

Asimismo, durante el periodo 1990-2022, la Cordillera Blanca manifestó un incremento de temperatura máxima, mínima y promedio, a ritmos de 0.034, 0.014 y 0.024 °C, respectivamente, destacando el aumento del primero. La variación y aumento de temperatura son producto de la radiación directa del sol en las montañas altas con magnitud media alta de 2191 kwh/m^3 [27]; ante esto, la Ref. [28] señala que mientras mayor sea la altitud, la capa atmosférica de protección frente a la radiación solar será menor, por lo que las montañas reciben mayor incidencia solar. Asimismo, según la Ref. [29], un factor que provoca el incremento de la temperatura ambiental es el suelo desnudo y rocoso, pues retienen mayor radiación solar, provocando el ascenso de temperatura y su capacidad conductora de calor [30].

La Ref. [31] evaluó el comportamiento albedo del nevado Quisoquipina (Cusco) entre los años 2012 y 2014, determinando un aumento de calor de 25 % ante la pérdida de 10 km^2 de área glaciar y estableciendo que, mientras el suelo desnudo por retroceso glaciar sea mayor, también lo será la temperatura superficial. La Ref. [32] llega a la misma conclusión, afirmando que el incremento de temperatura ambiental en la Cordillera Blanca irá en ascenso mientras haya mayor suelo descubierto.

La Fig. 6 presenta la variación calculada en la precipitación durante el periodo en estudio. Aunque existió una gran variabilidad en los datos, es posible determinar un incremento de 5.93 mm de agua por año.

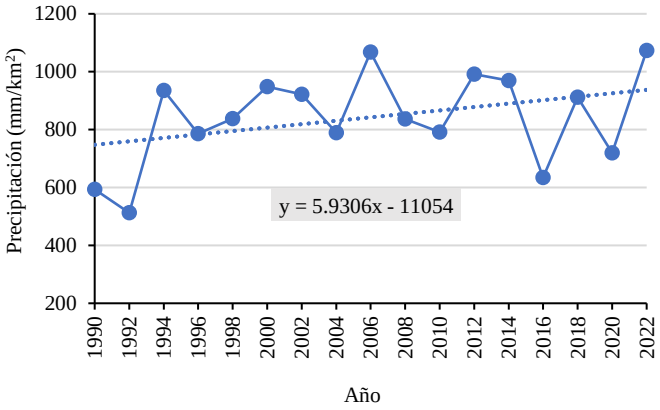

Fig. 6. Variación temporal de la precipitación.

La prueba de ANOVA realizada a la variable precipitación (Tabla N° 4) indica que no hubo influencia estadística significativa relacionada a las variaciones del área glaciar, debido a que el p-valor fue superior a 0.05, indicando que los valores de precipitación no tuvieron asociación ni efecto ante este suceso, coincidiendo, además, con los reportes de la Ref. [10] y Ref. [12] en los nevados Salluyo y Huaytapallana, respectivamente.

TABLA 4
PRUEBA DE ANOVA PARA LA PRECIPITACIÓN

ANOVA de un factor					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p-valor
Entre grupos	1597.264	17	101.675	2.249	0.54
Dentro de grupos	0	0	31.47		
Total	1597.264	17			

La formación de nieve y hielo se da fundamentalmente a causa de las precipitaciones en forma de granizo [33]; no obstante, el presente estudio se centra sólo en cambios a nivel de superficie y no a una dimensión volumétrica, lo cual, según la Ref. [34], podría resultar significativo ante una variabilidad de las precipitaciones. Además, en un glaciar de mayor espesor el tiempo para evidenciar algún cambio superficial será mayor a causa de las capas de hielo de las que está compuesta. La Ref. [35] hace mención de que el espesor del glaciar ubicado en la Cordillera Blanca tiene una variación de 2.50 - 8 metros.

En las precipitaciones se pudo evidenciar un comportamiento variado de aumento y disminución. Esto puede responder a que el nevado está situado en las cadenas montañosas de la cordillera de los Andes [36]. Esta cadena montañosa impide que los vientos húmedos que proceden de la costa del Pacífico escapen, ocasionando precipitaciones a modo de granizo producto del frío clima que predomina en el área. Al mismo tiempo, esto incrementa el grado de humedad relativa en la zona, que varía del 85 al 90 % [32] y su posterior condensación sólida. Asimismo, la precipitación en la Cordillera Blanca está también influenciada por la radiación solar, que presenta mayor intensidad a mayor altitud. Esta insolación ocasiona que el agua de las superficies hídricas como las lagunas de origen glaciar y los suelos húmedos se evaporen, y esta evaporación es posteriormente retribuida con la precipitación, produciendo de este modo un ciclo hídrico local [37].

Cabe mencionar que los fenómenos climatológicos de El Niño y La Niña también son responsables de la variación en las precipitaciones, sobre todo desde las categorías moderada a muy fuerte [38]. Producto de estas anomalías se genera una alteración de temperatura ambiental e incremento de evaporación y humedad relativa, lo que deviene en un posterior aumento o disminución de las precipitaciones a causa de la gran concentración de agua en las nubes [1]. Mientras el fenómeno del Niño en los nevados ocasiona un aumento temporal de las precipitaciones, el fenómeno de la Niña genera una disminución [38].

Diversos estudios sostienen que no solo el volumen total anual de precipitación resulta determinante para el balance de masa glaciar, sino también la proporción de precipitación en forma de nieve, su estacionalidad y su persistencia en superficie [39]. Así, incluso en escenarios donde la cantidad total de precipitación permanece relativamente constante, un aumento en la temperatura media puede traducirse en una disminución de las nevadas y un incremento de las lluvias, afectando negativamente la acumulación glaciar.

Muchos estudios destacan que la humedad atmosférica relativa y los cambios en la nubosidad también desempeñan un papel importante. En particular, la disminución de la humedad puede intensificar los procesos de ablación superficial mediante una mayor exposición a la radiación solar directa y al flujo turbulento de calor sensible [40]. Este efecto podría amplificar la pérdida de masa glaciar, aun cuando la precipitación no muestre tendencias decrecientes claras.

En consecuencia, resulta recomendable que futuros estudios sobre la dinámica glaciar de la Cordillera Blanca incluyan variables tales como la cantidad de precipitación sólida (a través de estaciones nivométricas o modelos de separación lluvia-nieve), indicadores de humedad relativa y nubosidad, así como análisis de eventos de lluvia sobre nieve, los cuales han sido identificados como factores críticos de inestabilidad en glaciares tropicales. Esta ampliación permitiría una comprensión más matizada y compleja de los mecanismos que regulan la dinámica de retroceso glaciar, trascendiendo el enfoque tradicional centrado exclusivamente en los promedios de precipitación total.

En el mismo sentido, la Ref. [41] menciona que es aconsejable complementar la información satelital con mediciones directas de campo y modelizaciones físicas específicas. Los levantamientos de campo proporcionan mediciones de alta precisión del espesor de hielo, tasa de ablación, acumulación nival y características morfológicas del glaciar, de modo que las mediciones in situ de balance de masa glaciar siguen siendo la referencia fundamental contra la cual deben calibrarse e interpretarse los datos satelitales. Tales datos incluyen, por ejemplo, la instalación de balizas de ablación, pozos de nieve y estaciones meteorológicas automáticas sobre los glaciares. También el uso de modelos físicos energéticos e hidrológicos ha demostrado ser crucial para comprender procesos subyacentes que las imágenes satelitales no capturan directamente. La Ref. [42] explican que "los modelos de balance de energía permiten vincular las variaciones de masa glaciar con variables climáticas específicas, considerando mecanismos como la conducción térmica, radiación y transferencia turbulenta" (p. 907). Estos modelos ofrecen la ventaja de proyectar escenarios futuros bajo condiciones climáticas cambiantes.

Es necesario reconocer que los estudios basados en imágenes satelitales y registros climáticos están sujetos a diversas fuentes de incertidumbre que pueden influir en la precisión de los resultados obtenidos sobre el retroceso glaciar en la Cordillera Blanca.

Por un lado, respecto a los datos satelitales, la incertidumbre puede originarse en factores como la resolución espacial de las imágenes y las limitaciones en la discriminación espectral de las superficies glaciares. De acuerdo con la Ref. [43], las variaciones en la calidad de la imagen, las condiciones atmosféricas (como la nubosidad persistente) y la presencia de detritos supraglaciares pueden dificultar la correcta

delimitación de los contornos glaciares, generando márgenes de error que oscilan entre ±5% y ±10% en la estimación de áreas glaciarizadas.

Por otro lado, en cuanto a los registros climáticos, las series temporales utilizadas presentan incertidumbres asociadas a la cobertura espacial limitada de estaciones meteorológicas en zonas de alta montaña y los procedimientos de homogenización de datos históricos. La Ref. [44], la escasez de estaciones a elevaciones superiores a los 4000 m s.n.m. en los Andes tropicales introduce sesgos en la representación precisa de las condiciones térmicas y pluviométricas relevantes para la dinámica glaciar.

Finalmente, es pertinente destacar que, aunque la incertidumbre es inherente a los estudios de teledetección y climatología de alta montaña, su identificación, evaluación y comunicación transparente no disminuye el valor científico de los hallazgos, sino que refuerza su credibilidad y utilidad para la toma de decisiones en gestión de riesgos y adaptación al cambio climático [41].

Ante esto, resulta imperativo no sólo documentar los cambios, sino también proponer estrategias prácticas de mitigación y adaptación para las comunidades locales y autoridades de gestión ambiental.

En primer lugar, desde un enfoque de mitigación estructural, se podría realizar la construcción de infraestructuras de regulación hídrica como represas pequeñas y sistemas de almacenamiento artificial. Estas infraestructuras permitirían acumular el excedente de agua de deshielo en épocas húmedas para su uso durante la estación seca.

En segundo término, se plantea el fortalecimiento de sistemas de gestión integral del recurso hídrico, mediante la implementación de Planes de Manejo de Cuencas Hidrográficas que incorporen la variabilidad climática en sus proyecciones. Dichos planes deben basarse en un enfoque ecosistémico, priorizando la conservación de zonas de recarga hídrica como bofedales y humedales altoandinos.

En el ámbito ambiental, se destaca la necesidad de implementar acciones de restauración ecosistémica en zonas degradadas, particularmente a través de la reforestación con especies nativas de alta montaña, lo cual puede mejorar la retención de agua en suelos y disminuir la erosión [45].

IV. Conclusiones

- El uso de las imágenes satelitales y las herramientas de Sistema de Información Geográfica permiten observar que hay un continuo proceso de desglaciación en los nevados de la Cordillera Blanca. Los datos climáticos indican que las variables meteorológicas están relacionadas con este proceso.
- Durante el periodo 1990-2022, la Cordillera Blanca ha sufrido un retroceso glaciar constante a razón de 5.30 km^2/año, reduciendo su masa glaciar de 593.45 a 423.82 km^2, lo que representa una pérdida de 28.58 %.
- La temperatura tuvo influencia estadísticamente significativa en el retroceso glaciar, presentando incrementos de 0.035, 0.014 y 0.024 °C/año en la temperatura máxima, mínima y promedio, respectivamente. De acuerdo con los resultados, a mayor temperatura, mayor será la pérdida de masa glaciar.
- La precipitación no presentó influencia estadística significativa; sin embargo, presenta una gran variabilidad que podría responder al amplio espesor de la masa glaciar como a los fenómenos meteorológicos de El Niño y La Niña; asimismo, la Cordillera Blanca, al ser una cadena de montañas tropicales posee gran cantidad de nubes cargadas de agua.

Referencias

[1] INAIGEM, «MEMORIA DESCRIPTIVA DEL INVENTARIO NACIONAL DE GLACIARES Y LAGUNAS DE ORIGEN GLACIAR 2023», jul. 2023. Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/7029db53-5118-4e93-8b2a-71e6e26db5f6

[2] MINAGRI, «Perú perdió el 51% de sus glaciares debido al cambio climático», Drupal. Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ana.gob.pe/noticia/peru-perdio-el-51-de-sus-glaciares-debido-al-cambio-climatico

[3] MINAM, «Montañas, Glaciares y Agua en cifras…», Montañas, Glaciares y Agua. Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.minam.gob.pe/glaciares/montanas-glaciares-y-agua-en-cifras/

[4] M. Zapata Luyo, «CAMBIO CLIMÁTICO, DEGLACIACIÓN Y PELIGROS EN ÁREAS GLACIARES Y PERIGLACIARES EN EL PERU Y ANCASH», *Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco p. 347-350*, p. 4, 2010.

[5] R. Pozada-Rengifo, L. Bravo-Toledo, y J. Iparraguirre, «Retroceso glaciar y el valor de los servicios ecosistémicos asociados con el recurso hídrico en la cuenca Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca), 2009-2018», *Tecnol. cienc. agua*, vol. 14, n.º 6, pp. 76-121, nov. 2023, doi: 10.24850/j-tyca-14-06-03.

[6] CEPLAN, «ANÁLISIS DEL PROCESO DE PÉRDIDA Y RETROCESO GLACIAR A NIVEL NACIONAL Y EL IMPACTO A NIVEL REGIONAL», *Marzo del 2023*, vol. 1, n.º 1, p. 30, 2023.

[7] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. McGraw Hill España, 2014. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

[8] M. Alva y J. Meléndez, «Aplicacion de la Teledeteccion para el analisis multitemporal de la regresion glaciar en la Cordillera Blanca», *Investigaciones Sociales*, vol. 13, pp. 71-83, jun. 2014, doi: 10.15381/is.v13i22.7216.

[9] J. D. Aedo Tapia y W. Quispe Curasco, «Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Chicón mediante el análisis multitemporal entre

los años 1985-2021, Cusco», *Repositorio Institucional - UCV*, 2022, Accedido: 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91586

[10] I. K. Ccallata Taype, «Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba y la influencia de los elementos climáticos, en el período 1985-2020», *Repositorio Institucional - UCV*, 2021, Accedido: 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60169

[11] A. Dioses Cardenas, «Dinámica de la cobertura glaciar del nevado Huascarán y de las lagunas glaciares adyacentes entre 1990 y el 2017 mediante la teledetección», *Repositorio Institucional - UCV*, 2017, Accedido: 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35309

[12] N. M. De la Cruz Chavez, «Varibilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú».

[13] M. R. Serrano Chuima, «"Impacto del cambio climático en el retroceso glaciar de la subcuenca del Río Sahuanay, provincia de Abancay en el 2017"», *Universidad César Vallejo*, 2018, Accedido: 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/27194

[14] R. B. Ramos Alonzo, «Evolución de la cobertura glaciar del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático», *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 2018, Accedido: 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3321

[15] A. Follanos Molero y J. A. Sarmientos Fuentes, «Evaluación de la regresión glaciar de los nevados Salkantay y Veronica mediante el análisis multi-temporal entre los años 1990-2020, Cusco», *Repositorio Institucional - UCV*, 2020, Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60800

[16] L. S. Taylor, D. J. Quincey, M. W. Smith, E. R. Potter, J. Castro, y C. L. Fyffe, «Multi-Decadal Glacier Area and Mass Balance Change in the Southern Peruvian Andes», *Front. Earth Sci.*, vol. 10, p. 863933, mar. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.863933.

[17] C. R. Stern, X. Navarro H., J. D. Pino N., y R. M. Vega S. M., "New Obsidian Source In The Araucanía Región (South Central Chile): Chemical And Archaeological Context Of The Black Riolitic Obsidian From The Nevados De Sollipulli," *Magallania (Punta Arenas)*, vol. 36, no. 2, pp. 185-193, 2008.

[18] C. Jasso-Castañeda, J. E. Gama-Castro, E. Solleiro-Rebolledo y J. Díaz-Ortega, "Morfogénesis, procesos y evolución del horizonte Bw cámbico en tefrapaleosuelos del volcán Nevado de Toluca," *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 64, no. 1, pp. 37-47, 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405332220120001000004&lng=es&tlng=es

[19] A. M. Lovell, J. R. Carr y C. R. Stokes, "Topographic controls on the surging behaviour of Sabche Glacier, Nepal (1967 to 2017)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 210, pp. 434–443, 2018. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.036.

[20] L. Hernán, "Eventos hidrometeorológicos de lluvia sobre nieve en los Andes de Chile Central," *Uchile.cl*, 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188859

[21] H. Purdie, B. Anderson, T. Chinn, I. Owens, A. Mackintosh y W. Lawson, "Franz Josef and Fox Glaciers, New Zealand: Historic length records," *Global and Planetary Change*, vol. 121, pp. 41–52, 2014. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.06.008.

[22] M. Baraer et al., "Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: a multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru," *Hydrological Processes*, vol. 29, no. 11, pp. 2561–2581, 2014. doi: 10.1002/hyp.10386.

[23] M. Rojas, "Alteración del clima en la provincia de Huaraz como consecuencia del cambio climático, periodo 1986-2027, Ancash, 2018," *Ucv.edu.pe*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12692/30025

[24] J. D. Hemingway, R. G. M. Spencer, D. C. Podgorski, P. Zito, I. S. Sen y V. V. Galy, "Glacier meltwater and monsoon precipitation drive Upper Ganges Basin dissolved organic matter composition," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 244, pp. 216–228, 2019. doi: 10.1016/j.gca.2018.10.012.

[25] A. I. López, "Los glaciares de todo el mundo se están derritiendo rápidamente, confirma el estudio más amplio hasta la fecha," *National Geographic En Español*, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.ngenespanol.com/ecologia/losglaciares-de-todo-el-mundo-se-estan-derritiendo-rapidamente/

[26] B. Francou, "Global warming spells disaster for tropical Andes glaciers," *The Guardian*, 27-ene-2015. [En línea]. Disponible en: https://www.theguardian.com/science/2015/jan/27/global-warming-glacier-depletion-andes

[27] S. Funaki y Y. Asaoka, "Long-term Change in Ablation Area of Tropical Glaciers by Landsat Data," *Procedia Engineering*, vol. 154, pp. 168–175, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.438.

[28] S. Ojha, K. Fujita, A. Sakai, H. Nagai y D. Lamsal, "Topographic controls on the debris-cover extent of glaciers in the Eastern Himalayas: Regional analysis using a novel high-resolution glacier inventory," *Quaternary International*, vol. 455, pp. 82–92, 2017. doi: 10.1016/j.quaint.2017.08.007.

[29] S. Bellaire, B. Jamieson, S. Thumlert, J. Goodrich y G. Statham, "Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 121, pp. 118–125, 2016. doi: 10.1016/j.coldregions.2015.10.010.

[30] C. S. Watson, O. King, E. S. Miles y D. J. Quincey, "Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers," *Remote Sensing of Environment*, vol. 217, pp. 414–425, 2018. doi: 10.1016/j.rse.2018.08.020.

[31] J. I. López-Moreno et al., "Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru," *Global and Planetary Change*, vol. 112, pp. 1–11, 2014. doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.10.010.

[32] J. R. Janke, S. Ng y A. Bellisario, "An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile," *Geomorphology*, vol. 296, pp. 142–152, 2017. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.09.002.

[33] A. Lo Vecchio, M. G. Lenzano, M. Durand, E. Lannutti, R. Bruce y L. Lenzano, "Estimation of surface flow speed and ice surface temperature from optical satellite imagery at Viedma glacier, Argentina," *Global and Planetary Change*, vol. 169, pp. 202–213, 2018. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.08.001.

[34] D. Fugazza, A. Senese, R. S. Azzoni, M. Maugeri, D. Maragno y G. A. Diolaiuti, "New evidence of glacier darkening in the Ortles-Cevedale group from Landsat observations," *Global and Planetary Change*, vol. 178, pp. 35–45, 2019. doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.04.014.

[35] M. Wortmann, T. Bolch, B. Su y V. Krysanova, "An efficient representation of glacier dynamics in a semi-distributed hydrological model to bridge glacier and river catchment scales," *Journal of Hydrology*, vol. 573, pp. 136–152, 2019. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.006.

[36] A. Rivera, F. Bown, F. Napoleoni, C. Muñoz y M. Vuille, *Balance demasaglaciar*, Valdivia, Chile: Centro de Estudios Científicos, 2016.

[37] H. A. Fernández Navarro y F. J. Ferrando Acuña, "Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa," *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, vol. 27, no. 2, 2018. doi: 10.15446/rcdg.v27n2.63370.

[38] P. K. Garg, A. Shukla y A. S. Jasrotia, "Influence of topography on glacier changes in the central Himalaya, India," *Global and Planetary Change*, vol. 155, pp. 196–212, 2017. doi: 10.1016/j.gloplacha.2017.07.007.

[39] A. Rabatel *et al.*, «Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change», *The Cryosphere*, vol. 7, n.º 1, pp. 81-102, ene. 2013, doi: 10.5194/tc-7-81-2013.

[40] J. E. Sicart, R. Hock, y D. Six, «Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden», *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, n.º D24, 2008, doi: 10.1029/2008JD010406.

[41] M. Zemp *et al.*, «Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century», *Journal of Glaciology*, vol. 61, n.º 228, pp. 745-762, ene. 2015, doi: 10.3189/2015JoG15J017.

[42] F. Pellicciotti *et al.*, «A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity», *Hydrological Processes*, vol. 22, n.º 19, pp. 3980-3997, sep. 2008, doi: 10.1002/hyp.7085.

[43] F. Paul *et al.*, «On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data», *Annals of Glaciology*, vol. 54, n.º 63, pp. 171-182, ene. 2013, doi: 10.3189/2013AoG63A296.

[44] M. Vuille *et al.*, «Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead», *Earth-Science Reviews*, vol. 176, pp. 195-213, ene. 2018, doi: 10.1016/j.earscirev.2017.09.019.

[45] J. T. Bury *et al.*, «Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru», *Climatic Change*, vol. 105, n.º 1, pp. 179-206, mar. 2011, doi: 10.1007/s10584-010-9870-1.