

Evaluación espacial del retroceso glaciar del nevado Pastoruri y su impacto en la dinámica turística 1987 - 2025

Spatial Assessment of Glacier Retreat of Nevado Pastoruri and Its Impact on Tourism Dynamics (1987–2025)

Niler Rosario Chahua García^{1,a} , Hatzia Angeline Landa Santiago^{1,b} , Frank James Tadeo Simón^{1,b} , Emmanuel Antonio Gómez Castro^{1,b} 

Filiación institucional

¹ Municipalidad distrital de Sillapata, Huánuco, Perú.

Grado académico

^a Magíster en Investigación.
^b Estudiante Universitario.

Recibido: 20-05-25

Aprobado: 04-07-25

Publicado: 18-07-25

RESUMEN

El retroceso glaciar del Nevado Pastoruri constituye una de las evidencias más críticas del cambio climático en la Cordillera Blanca, generando alteraciones ambientales y socioeconómicas significativas. El estudio fue evaluar espacialmente el retroceso glaciar del Nevado Pastoruri y su impacto en la dinámica turística entre 1987 al 2025. Donde se integró el análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI y Landsat 9 OLI/TIRS, procesadas mediante el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) y herramientas SIG, lo que permitió delimitar y cuantificar la variación de la superficie glaciar. Asimismo, se aplicó un modelo de proyección lineal para estimar la tendencia hacia 2035 y se analizaron los registros turísticos reportados por MINCETUR, SERNANP y INAIGEM. Los resultados demostraron una pérdida del 48 % del área glaciar, reduciéndose de 21,09 km² en 1987 a 10,97 km² en 2025, con una tasa media anual de 0,27 km². La proyección al año 2035, que estima una superficie reducida a 8,27 km², confirma la continuidad del proceso de degradación glaciar del Pastoruri, cuyo retroceso no solo evidencia una alta vulnerabilidad ambiental, sino que también genera impactos directos en el turismo local, reflejándose en la disminución de visitantes, la transformación del paisaje natural y el deterioro de la principal actividad económica de la zona. En conjunto, estos resultados permiten concluir que la pérdida glaciar del Pastoruri constituye un proceso crítico con repercusiones negativas tanto en los ecosistemas de montaña como en las actividades turísticas que dependen de este atractivo glaciar.

Palabras clave: cambio climático; turismo; teledetección; glaciar; degradación.

ABSTRACT

The glacier retreat of Nevado Pastoruri constitutes one of the most critical pieces of evidence of climate change in the Cordillera Blanca, generating significant environmental and socioeconomic alterations. The study was to spatially evaluate the glacier retreat of Nevado Pastoruri and its impact on tourism dynamics between 1987 and 2025. Where the multitemporal analysis of Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI, and Landsat 9 OLI/TIRS satellite images was integrated, processed through the NDSI index (Normalized Difference Snow Index) and GIS tools, which allowed the delimitation and quantification of the variation of glacier surface area. Likewise, a linear projection model was applied to estimate the trend toward 2035, and tourism records reported by MINCETUR, SERNANP, and INAIGEM were analyzed. The results demonstrated a loss of 48% of the glacier area, decreasing from 21.09 km² in 1987 to 10.97 km² in 2025, with an average annual rate of 0.27 km². The projection to the year 2035, which estimates a surface reduced to 8.27 km², confirms the continuity of the glacier degradation process of Pastoruri, whose retreat not only evidences high environmental vulnerability, but also generates direct impacts on local tourism, reflected in the decrease in visitors, the transformation of the natural landscape, and the deterioration of the main economic activity of the area. Taken together, these results allow concluding that the glacier loss of Pastoruri constitutes a critical process with negative repercussions both on mountain ecosystems and on tourism activities that depend on this glacier attraction.

Keywords: climate change; tourism; remote sensing; glacier; degradation.

Citar como: Chahua García N. R., Landa Santiago H. A., Tadeo Simón F. J., Gómez Castro E. A. (2025). Evaluación espacial del retroceso glaciar del nevado Pastoruri y su impacto en la dinámica turística 1987 - 2025. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 2(2). <https://doi.org/10.37711/repiama.2025.2.2.6>



©Los autores.
Este es un artículo bajo la licencia de
Creative Commons, CC-BY 4.0

Introducción

El Nevado Pastoruri enfrenta un retroceso glaciar acelerado que, en las últimas décadas, se ha convertido en una evidencia visible para la población local y los visitantes. Este proceso no es aislado: corresponde a la tendencia que se observa a nivel global, donde la pérdida de masa glaciar se ha intensificado debido al aumento sostenido de la temperatura atmosférica (Hugonnet et al., 2021). En los Andes tropicales, esta vulnerabilidad es aún más marcada. Como señalan Veettil y Kamp (2019), los glaciares intertropicales reaccionan de forma casi inmediata ante variaciones térmicas, reduciendo rápidamente su espesor y extensión. Esta situación ha alterado de manera significativa los ecosistemas altoandinos, particularmente en la Cordillera Blanca, donde se han documentado cambios profundos en la estabilidad ecológica y climática (Rabatel et al., 2013).

Los antecedentes sobre el Pastoruri evidencian que la pérdida de hielo no solo transforma el paisaje, sino también actividades humanas estrechamente vinculadas a él. En este sentido, la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA, 2023) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) han señalado que el derretimiento acelerado de los glaciares tropicales afecta directamente la disponibilidad de agua para usos multisectoriales (como riego, ganadería y abastecimiento), impactando la seguridad hídrica de las comunidades andinas que dependen de los aportes glaciares y modificando la percepción del territorio y las actividades económicas locales. Entre otros estudios señalan que el retroceso glaciar es un proceso complejo que transforma el paisaje y genera incertidumbre sobre su evolución futura. En este sentido, Soto (2024) explica que los glaciares de montaña responden a múltiples factores climáticos y geomorfológicos, lo que dificulta predecir con precisión su desaparición y plantea desafíos para su gestión. Esta transformación del entorno también influye en las actividades turísticas, ya que la pérdida del hielo modifica la experiencia del visitante y favorece una transición hacia formas de turismo educativo y de interpretación ambiental. Situaciones similares han sido documentadas en otros glaciares del mundo, donde el retroceso ha obligado a replantear la oferta turística tradicional (Purdie, 2013).

El retroceso de los glaciares tropicales ha sido documentado mediante mediciones directas y análisis multitemporales que muestran una reducción acelerada de hielo en las últimas décadas. En la Cordillera Blanca, Bury et al. (2011) registraron una pérdida total de 0.022 km³ de hielo y un retroceso frontal cercano a 8 m por década en el glaciar Yanamarey, mientras que evaluaciones de la Autoridad Nacional del Agua (2014) reportaron una disminución superior al 60 % de la superficie glaciar entre 1975 y 2014, acompañada de la formación y expansión de lagunas proglaciales. Los glaciares andinos han sido ampliamente documentados a escala regional y continental. En este sentido, Masiokas et al. (2020) evidencian que los glaciares de los Andes han experimentado una pérdida sostenida de masa y superficie durante las últimas décadas, como resultado del aumento de la temperatura atmosférica y de cambios en los patrones de precipitación. Estos autores señalan que dicha tendencia es generalizada a lo largo de la cordillera andina, aunque con variaciones espaciales, lo que permite contextualizar el retroceso observado en el nevado Pastoruri dentro de una dinámica regional de degradación glaciar, y estudios globales de Zemp et al. (2015) indican que los glaciares de montaña han perdido más del 50 % del volumen total desde 1850, lo que evidencia una tendencia generalizada. Ragettli et al. (2013) y Fyke et al. (2018) destacan que las interacciones entre el hielo y el sistema climático incluyendo la respuesta a variaciones de temperatura, retroalimentaciones de albedo y cambios en los patrones de radiación y precipitación condicionan tanto la evolución de la masa glaciar como su sensibilidad ante el calentamiento global. Esta revisión ayuda a comprender los mecanismos que subyacen al retroceso observado en regiones como los Andes tropicales, donde los cambios climáticos afectan profundamente el balance de masa de los glaciares.

Otras investigaciones han demostrado que el retroceso glaciar constituye un fenómeno de impacto global que modifica profundamente los ciclos hidrológicos y la estabilidad territorial en zonas de montaña. Farinotti et al. (2019) estiman que más del 67 % del volumen glaciar mundial podría desaparecer durante este siglo bajo escenarios climáticos actuales, alterando la seguridad hídrica de millones de personas. De igual forma, Hock et al. (2019) señalan que la reducción progresiva de la masa glaciar modificará los caudales base de los ríos, generando vulnerabilidad en poblaciones que dependen del deshielo. Desde la perspectiva socioambiental, Thomas et al. (2019) sostienen que el cambio climático no solo genera impactos físicos directos, sino que

la vulnerabilidad de las comunidades ante esos cambios depende de múltiples factores sociales, culturales y económicos interrelacionados. Esta aproximación multidimensional es útil para entender que el retroceso glaciar en los Andes no solo transforma el paisaje, sino que también reconfigura las relaciones hidrosociales, las prácticas productivas y las experiencias humanas, incluidas las vinculadas al turismo y al uso del territorio en contextos de montaña, Maurer et al. (2020) evidenciaron una aceleración sin precedentes en la pérdida glaciar del Himalaya durante los últimos 40 años. Asimismo, Shugar et al. (2021) demostraron un incremento mundial en el número y volumen de lagos glaciares, aumentando el riesgo de desbordes repentinos. Finalmente, Radić et al. (2014) concluyen que los glaciares pequeños y medianos contribuirán significativamente al aumento del nivel del mar, pese a su menor volumen, debido a la rapidez de su deshielo.

Los cambios registrados en la criósfera tienen efectos directos sobre la dinámica hidrológica, la estabilidad geomorfológica y las actividades económicas vinculadas al entorno glaciar. Purdie (2013) demostró que la reducción del hielo en Nueva Zelanda obligó a modificar el acceso turístico y a actualizar los sistemas de seguridad, mientras que Gerber et al. (2025), mediante un enfoque de systems thinking aplicado al esquí sobre glaciares en los Alpes suizos, destacan que el calentamiento y la pérdida de hielo provocan desafíos tanto climáticos como socioeconómicos, afectando la viabilidad de actividades glaciares tradicionales y exigiendo estrategias de adaptación que consideren la vulnerabilidad climática y las dinámicas del sector turístico local. En el ámbito andino, informes de INAIQUEM (2020) señalan que glaciares como Pastoruri, Broggi y Artesonraju presentan una reducción continua de superficie y cambios en la estabilidad del terreno, lo cual ha impulsado la transición hacia modalidades de turismo interpretativo y de contemplación. En este contexto, Pozada-Rengifo et al. (2023) evidencian que el retroceso glaciar compromete los servicios ecosistémicos y la gestión sostenible de los territorios de alta montaña, mientras que Pérez Forero (2019) sostiene que el ecoturismo en estos ambientes debe orientarse hacia estrategias de conservación, educación ambiental y manejo adaptativo frente a la transformación del paisaje glaciar. Bajo estas condiciones, el análisis del retroceso glaciar y su relación con la actividad turística en el nevado Pastoruri adquiere relevancia para comprender impactos ecológicos y socioeconómicos, así como para orientar acciones de manejo sostenible en ambientes de alta montaña.

Para comprender la magnitud de este proceso, es necesario considerar que un glaciar es un sistema dinámico cuya estabilidad depende del balance entre acumulación y pérdida de nieve (Jennings & Hambrey, 2021). Su retroceso puede ser monitoreado mediante técnicas de teledetección, entre ellas el índice NDSI, el cual permite identificar y cuantificar con alta precisión las áreas cubiertas por nieve y hielo a partir de imágenes satelitales multitemporales (Bousbaa et al., 2024). Estas herramientas brindan información confiable sobre la transformación física del Nevado Pastoruri y contribuyen a comprender cómo la pérdida de cobertura glaciar se ha intensificado durante las últimas décadas.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar espacialmente el retroceso glaciar del Nevado Pastoruri y su impacto en la dinámica turística durante el periodo 1987 al 2025, mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat y la revisión de registros turísticos oficiales. Esta aproximación permite comprender de manera integrada cómo la pérdida de superficie glaciar influye en los patrones de visita y qué implicancias tiene para la gestión turística y ambiental del área.

Métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, utilizando métodos de medición y análisis numérico para evaluar el retroceso glaciar del Nevado Pastoruri y su relación con la dinámica turística durante el periodo 1987–2025. El enfoque cuantitativo permitió cuantificar los cambios espaciales del glaciar mediante imágenes satelitales y procesamientos geoespaciales, así como analizar las variaciones en los registros de afluencia turística asociados a esta disminución.

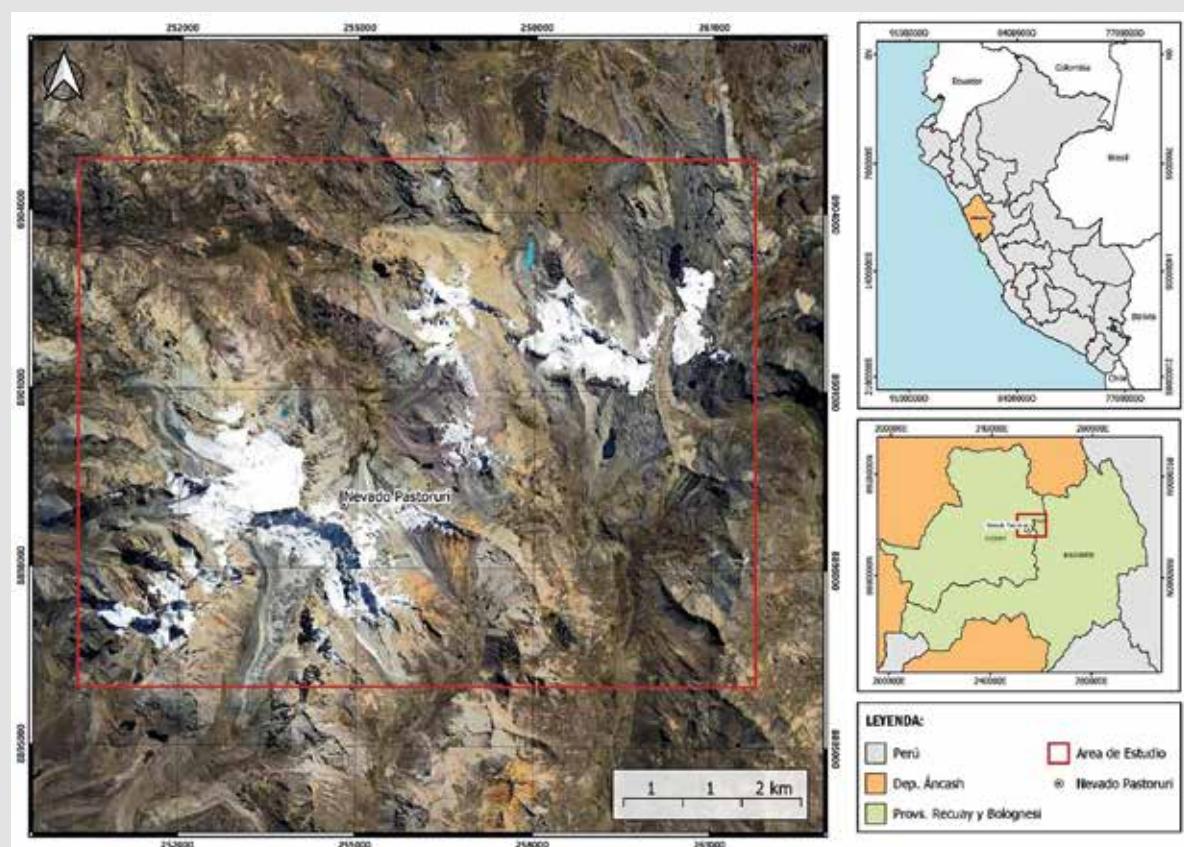
El estudio fue de tipo no experimental, longitudinal y descriptivo-correlacional, dado que no se manipularon las variables, sino que se analizaron tal como ocurrieron en su contexto real a lo largo del tiempo. La temporalidad longitudinal permitió identificar tendencias, patrones de cambio y la evolución conjunta del retroceso glaciar y el comportamiento turístico durante más de tres décadas.

El diseño metodológico combinó teledetección, análisis documental y estadística descriptiva, con el propósito de establecer relaciones entre el cambio físico del glaciar y la variación de la actividad turística en el área de influencia del Pastoruri.

Área de estudio

El área de estudio corresponde al Nevado Pastoruri, ubicado en la Cordillera Blanca, región Áncash, provincia de Recuay, distrito de Cátac, dentro del Parque Nacional Huascarán, localizado en las coordenadas $9^{\circ}52'30''$ de latitud sur y $77^{\circ}10'15''$ de longitud oeste, con una altitud máxima de 5 240 m s. n. m. El área presenta un relieve de alta montaña, caracterizado por pendientes pronunciadas que superan el 35 %, presencia de morrenas glaciares, depósitos glaciofluviales y lagunas de origen glaciar, las cuales evidencian procesos geomorfológicos propios de ambientes glaciares. El clima corresponde a alta montaña tropical, con temperaturas medias anuales comprendidas entre -5°C y 8°C y marcada amplitud térmica diaria. Desde el punto de vista ambiental, el Nevado Pastoruri constituye un ecosistema frágil, con cobertura vegetal escasa propia de la puna altoandina y fauna adaptada a condiciones extremas, además de cumplir un rol estratégico en la conservación de paisajes glaciares. En el ámbito social y económico, el área representa un importante atractivo turístico, generando actividades económicas locales vinculadas al turismo de naturaleza; sin embargo, el retroceso glaciar observado en las últimas décadas ha modificado significativamente el paisaje y ha incrementado la vulnerabilidad ambiental del área (Figura 1).

Figura 1
Mapa de ubicación del nevado Patoruri



Fuente de datos

El estudio utilizó información satelital, cartográfica y estadística proveniente de fuentes oficiales y literatura científica. El análisis del retroceso glaciar se realizó a partir de imágenes satelitales Landsat TM, ETM+ y OLI/TIRS, descargadas desde la plataforma USGS Earth Explorer, administrada por el United States Geological Survey (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov>), seleccionadas con baja cobertura nubosa y procesadas mediante correcciones radiométricas y atmosféricas para asegurar la comparabilidad multitemporal. La delimitación y validación de las áreas glaciares se apoyó en información cartográfica oficial del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar (INGLOG), elaborado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), disponible en su repositorio institucional (https://www.gob.pe/institucion/inaigem/informes_publicaciones/4746459-inventario-nacional-de-glaciares-y-lagunas-de-origen-glaciar-inglog-ii), el cual fue generado mediante imágenes satelitales, fotointerpretación y sistemas de información geográfica (SIG). Los datos turísticos fueron obtenidos tanto de fuentes estadísticas oficiales del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR), a través de sus informes de flujo de visitantes y demanda turística (<https://www.gob.pe/institucion/mincetur/informes-publicaciones?sector=turismo>), como de artículos científicos y estudios previos que analizan la dinámica del turismo en áreas glaciares y de montaña del Perú, entre los que destacan los estudios desarrollados por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM, 2020; 2023), los cuales evalúan la evolución del uso turístico del Nevado Pastoruri en relación con el retroceso glaciar, así como las investigaciones de Escate y Zamora (2021), que abordan la percepción del visitante y la presión antrópica asociada a la actividad turística en la Cordillera Blanca. Asimismo, los reportes oficiales del Ministerio del Ambiente (INAIGEM, 2023) complementan este análisis al vincular la gestión ambiental con el turismo sostenible en zonas de alta montaña. Estos estudios proporcionaron información complementaria sobre tendencias de visita, percepción turística y presión antrópica en el entorno del Nevado Pastoruri; dichos datos secundarios fueron sistematizados, contrastados y analizados mediante estadística descriptiva y análisis temporal, e integrados con los resultados del análisis espacial del retroceso glaciar.

a. Tipo de estudio

La investigación fue de tipo aplicada, orientada a generar información útil para la gestión ambiental y turística, aportando evidencia técnica sobre los efectos del cambio climático en el Nevado Pastoruri.

b. Variable e instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados incluyeron imágenes satelitales obtenidas de la plataforma USGS Earth Explorer, fichas de análisis documental y bases de datos oficiales. El procesamiento de los datos se realizó con los softwares QGIS 3.x para el análisis espacial y Microsoft Excel 2019 para la sistematización y el análisis estadístico.

Técnicas y procedimientos de la recolección de datos

Para evaluar el retroceso glaciar se utilizó la teledetección multitemporal, comparando la extensión del hielo en diferentes años de estudio. Las imágenes satelitales Landsat fueron descargadas desde la plataforma USGS Earth Explorer y procesadas en el software QGIS. A partir de estas imágenes se elaboraron mapas de cobertura glaciar cada cinco años, desde 1987 hasta 2025, seleccionando escenas con baja presencia de nubes. Antes del análisis, las imágenes fueron ajustadas para mejorar su calidad y permitir la comparación entre los distintos años. Este proceso incluyó la corrección de los valores originales de las imágenes para obtener valores de reflectancia, así como ajustes para reducir los efectos de la atmósfera y del relieve, especialmente importantes en zonas de alta montaña.

La identificación de las áreas cubiertas por nieve y hielo se realizó mediante la aplicación del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI), el cual se calcula a partir de la diferencia entre la reflectancia de la banda verde y la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR), de acuerdo con la siguiente expresión general:

$$NDSI = \frac{\text{Banda Verde} + \text{Banda SWIR}}{\text{Banda Verde} - \text{Banda SWIR}}$$

En función del sensor Landsat empleado en cada periodo de análisis, el NDSI se calculó utilizando las bandas correspondientes: para Landsat 4–5 TM y Landsat 7 ETM+, se emplearon la Banda 2 (verde) y la Banda 5 (SWIR); mientras que para Landsat 8–9 OLI, se utilizaron la Banda 3 (verde) y la Banda 6 (SWIR). El cálculo del índice se realizó en QGIS mediante la calculadora raster. Para la identificación de las áreas cubiertas por nieve y hielo se consideró un valor límite del NDSI comprendido entre 0 y 0,4 que permitieron identificar las áreas cubiertas por nieve y hielo, las cuales fueron posteriormente delimitadas y contrastadas con la cartografía oficial del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). Finalmente, se corrigieron posibles errores asociados a sombras o nubosidad y se calculó el área glaciar (km^2) y su variación temporal. Los datos turísticos, por su parte, fueron únicamente recopilados y analizados de manera descriptiva, conforme a lo indicado en la sección de Fuente de datos.

Análisis de datos

El área de los glaciares se determinó a partir de los mapas generados en QGIS, donde las zonas cubiertas por nieve y hielo fueron delimitadas mediante la aplicación del índice NDSI para cada año de análisis. Una vez obtenidos los polígonos correspondientes a la cobertura glaciar, se utilizó la herramienta de cálculo de geometría del software para medir la superficie de cada polígono, obteniendo el área glaciar total expresada en kilómetros cuadrados (km^2). Estos valores fueron organizados en una tabla y exportados a Microsoft Excel, donde se calcularon las diferencias absolutas perdida de superficie glaciar entre los distintos períodos evaluados.

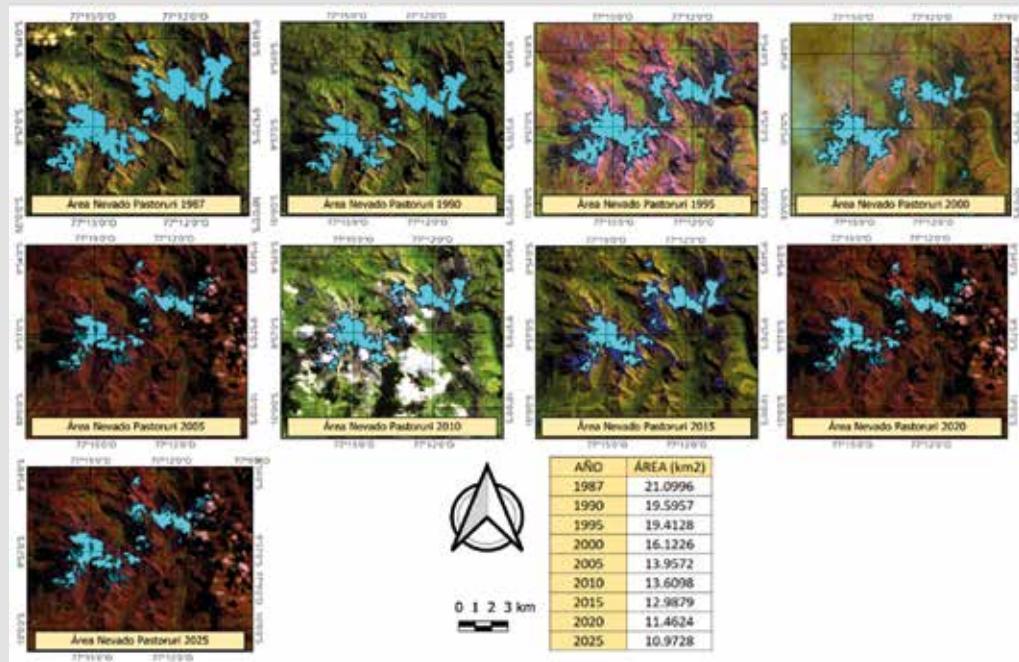
Los datos turísticos proceden de registros oficiales de afluencia de visitantes al Nevado Pastoruri y su área de influencia, obtenidos de informes estadísticos del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR), así como de estudios e investigaciones previas que analizan la dinámica turística en la Cordillera Blanca, tal como se detalla en la sección de Fuente de datos. Esta información fue recopilada y sistematizada en Microsoft Excel, permitiendo su análisis mediante estadística descriptiva, incluyendo el cálculo de totales anuales y la identificación de tendencias en el número de visitantes.

La integración entre el retroceso glaciar y las visitas turísticas se realizó mediante un análisis correlacional simple, comparando la variación del área glaciar con los registros de afluencia turística correspondientes a los mismos períodos de análisis. Este procedimiento permitió evaluar la relación entre la disminución de la superficie glaciar y los cambios en la actividad turística. Adicionalmente, se aplicó un análisis de tendencia mediante proyección lineal sobre la serie temporal del área glaciar, con el fin de estimar la evolución futura del retroceso glaciar hacia el año 2035. La combinación de ambos análisis permitió evaluar de manera conjunta la evolución del glaciar y la dinámica turística.

Resultados

La Figura 2 muestra la variación espacial del área glaciar del Nevado Pastoruri entre 1987 y 2025, evidenciando una reducción progresiva y constante de su superficie. En 1987 el glaciar ocupaba aproximadamente 21,09 km^2 , mientras que en 2025 disminuyó a 10,97 km^2 , lo que representa una pérdida del 48 % de su extensión original. Este retroceso sostenido, especialmente marcado entre los años 2000 y 2015, refleja la continua degradación del hielo y la transformación del paisaje natural. De manera sustentable, estos resultados demuestran el impacto ambiental y turístico asociado a la pérdida glaciar, ya que la disminución del área de nieve ha reducido las actividades recreativas tradicionales y modificado el atractivo del lugar, afectando la dinámica económica y social de las comunidades vinculadas al turismo en el Pastoruri.

Figura 2
Secuencia espacial del retroceso glaciar (1987–2025)



La Tabla 1 evidencia que el glaciar del Nevado Pastoruri ha experimentado un retroceso continuo y acelerado durante el periodo 1987–2025, reduciendo su superficie de 21.09 km² a 10.97 km², lo que equivale a una pérdida aproximada del 48 % de su área inicial. Los intervalos con mayor disminución relativa se registran en los periodos 1997–2000 y 2000–2005, con reducciones superiores al 14 %, lo que refleja episodios de intenso impacto climático. Con el fin de cuantificar la velocidad de este retroceso glaciar, se calculó la tasa media anual de pérdida del área, empleando la siguiente expresión:

$$\text{Tasa media anual de pérdida} = \frac{A_{\text{inicial}} - A_{\text{final}}}{n}$$

donde área inicial corresponde al área glaciar en 1987, área final en 2025 y n al número total de años del periodo analizado (38 años).

$$\text{Tasa media anual} = \frac{21,0996 \text{ Km}^2 - 10,9728 \text{ Km}^2}{38 \text{ años}} = 0,2665 \text{ Km}^2/\text{año}$$

Este resultado indica que, en promedio, el glaciar del Nevado Pastoruri pierde aproximadamente 0.27 km² de superficie por año, lo que confirma un proceso de degradación progresivo y sostenido a lo largo del periodo de estudio.

Tabla 1.
Variación absoluta y porcentual del área glaciar del Nevado Pastoruri (1987–2025)

Año	Área (Km ²)	Variación absoluta (Km ²)	Variación porcentual (%)
1987	21.0996		
1992	19.5957	-1.5039	-7,13 %
1997	19.4128	-0.1829	-0,93 %
2000	16.1226	-3.2902	-16,94 %
2005	13.9572	-2.1654	-13,44 %
2010	13.6098	-0.3474	-2,49 %
2015	12.9879	-0.6219	-4,57 %
2020	11.4624	-1.5255	-11,74 %
2025	10.9728	-0.4896	-4,27 %

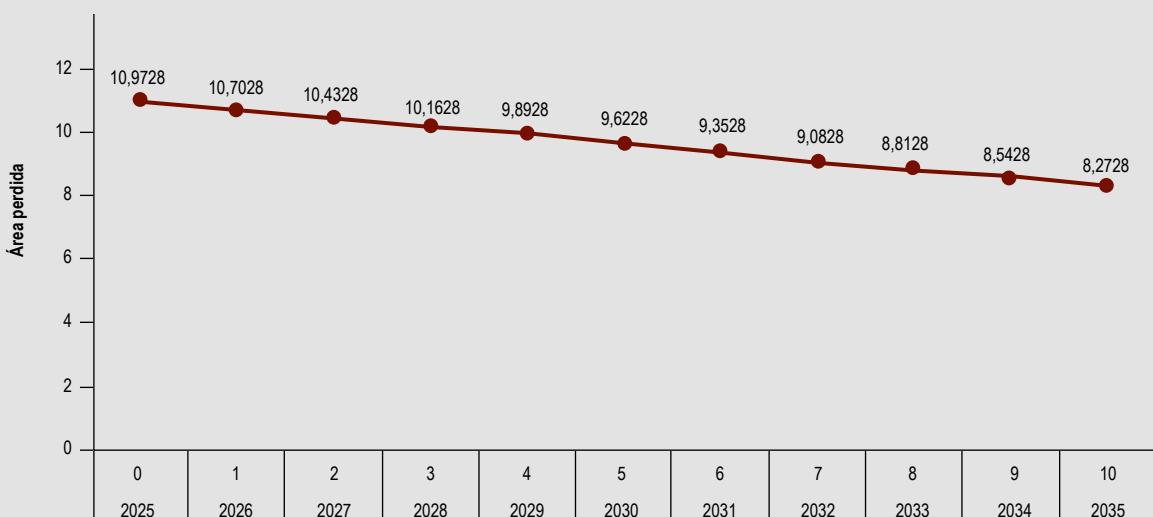
En la Figura 3, la gráfica muestra la proyección del área glaciar del Nevado Pastoruri desde el año 2025 hasta el 2035. Con el fin de estimar la evolución futura del área glaciar del Nevado Pastoruri, se aplicó un modelo lineal simple de tendencia, ampliamente utilizado en estudios glaciológicos (Huss & Hock, 2018; Zemp et al., 2019). La proyección se realizó a partir de la tasa media anual de pérdida calculada previamente, empleando la siguiente expresión:

$$At = A_{2025} - (r \times \Delta t)$$

- A_t = área proyectada,
- A_{2025} = 10.9728 km²,
- r = 0.27 km²/año
- Δt = número de años posteriores a 2025.

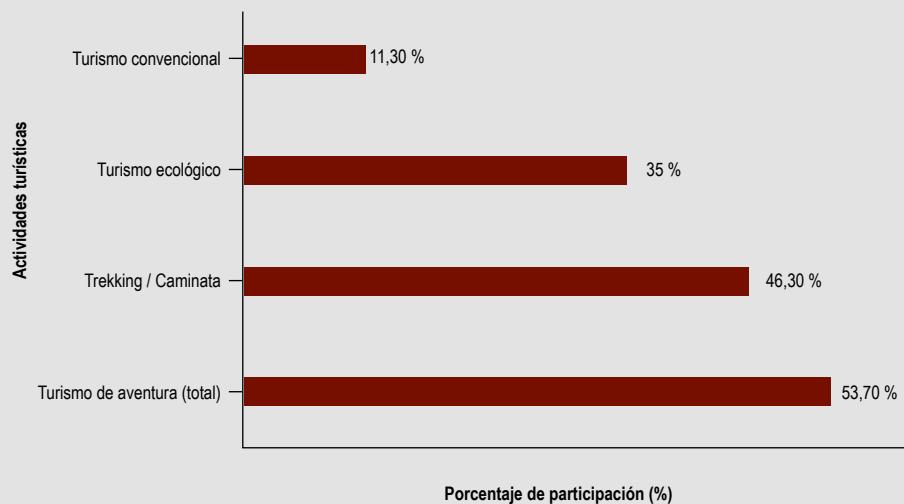
Según el modelo lineal aplicado como se observa en la imagen, el área pasaría de 10,97 km² en 2025 a 8,27 km² en 2035, lo que representa una pérdida estimada del 24,6 % en diez años. Esta proyección confirma que el retroceso glaciar seguirá avanzando de manera sostenida si las condiciones actuales se mantienen, lo que implicaría una disminución progresiva del atractivo natural del lugar. Desde una perspectiva sustentable, estos resultados resaltan la necesidad de considerar el retroceso del Pastoruri no solo como un fenómeno físico, sino también como un proceso que afecta la continuidad del turismo local y el aprovechamiento responsable del patrimonio natural que caracteriza a la Cordillera Blanca.

Figura 3
Representación gráfica del área proyectada al año 2035



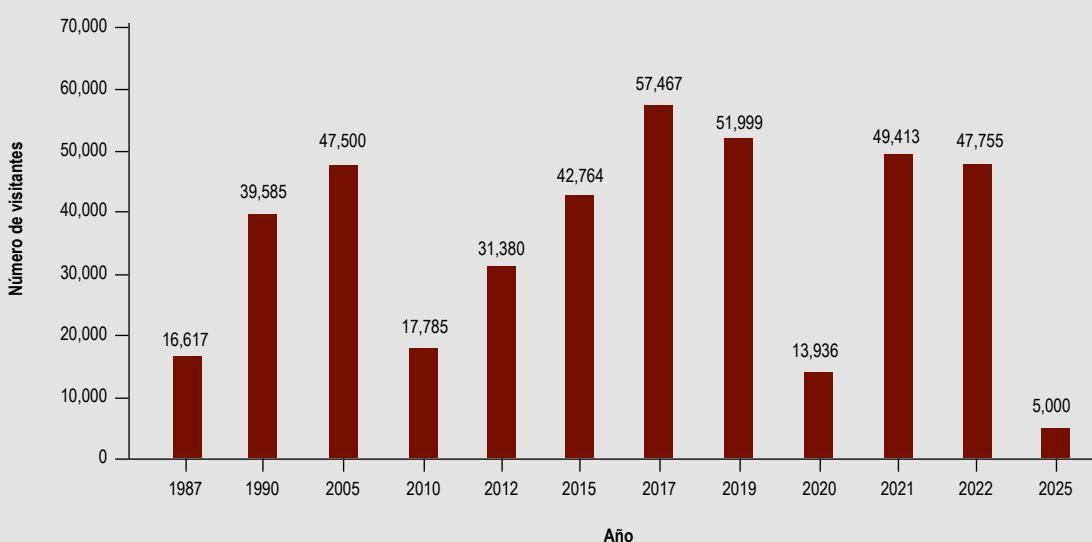
La figura 4 muestra cómo se distribuían las actividades turísticas entre los años 1985 y 2005, evidenciando que el turismo de aventura era la actividad predominante, alcanzando 53.7 % del total de visitantes. Dentro de este tipo de turismo, la modalidad más practicada era el trekking o caminata, con 46.3 %, lo que indica un fuerte interés por actividades físicas y recorridos naturales. En segundo lugar, se ubicaba el turismo ecológico, con 35 % de visitantes, reflejando un interés importante por conocer ecosistemas y paisajes. Finalmente, el turismo convencional representaba solo 11.3 %, mostrando que las actividades tradicionales eran mucho menos demandadas en comparación con las experiencias de naturaleza y aventura propias del lugar.

Figura 4
Porcentaje de actividad turística histórica (1985–2005)



En Figura 5 evidencia que la afluencia turística en el Nevado Pastoruri aumentó de forma significativa a partir del año 2010, alcanzando su punto máximo en 2017, con más de 70 000 visitantes registrados. Esta tendencia muestra una relación inversamente proporcional con la pérdida del glaciar: conforme disminuyó la superficie de hielo, el turismo recreativo sobre nieve se redujo, pero se fortaleció un turismo educativo y ambiental. En los años más recientes, la cantidad de visitantes se ha mantenido estable, consolidando a Pastoruri como un destino emblemático de sensibilización frente al cambio climático en la Cordillera Blanca.

Figura 5
Tendencia del turismo en el Nevado Pastoruri (1985–2025)



El análisis de correlación simple entre la superficie glaciar del Nevado Pastoruri y la afluencia turística mostró una relación inversa moderada ($r = -0.66$), lo que indica que, a medida que disminuye el área glaciar, la dinámica de visitas turísticas tiende a modificarse. Si bien el resultado no evidencia una relación estadísticamente significativa estricta ($p > 0.05$), la tendencia observada permite identificar una asociación clara entre la pérdida de cobertura glaciar y los cambios en el comportamiento turístico a lo largo del periodo analizado.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el retroceso glaciar del Nevado Pastoruri sigue una tendencia coherente con lo evidenciado en diversos estudios internacionales. Coincidimos con Hugonnet et al. (2021), quienes reportan una aceleración significativa en la pérdida de masa glaciar a nivel global durante las dos últimas décadas. Esta tendencia global respalda que la disminución registrada en Pastoruri no sea un fenómeno aislado, sino parte de un patrón generalizado de retroceso glaciar. De igual manera, nuestros resultados coinciden con lo reportado por Baraer et al. (2012) en la Cordillera Blanca, quienes encontraron reducciones de caudal seco cercanas al 30 %, lo cual se relaciona con la disminución de superficie que observamos en Pastoruri.

Asimismo, nuestros hallazgos son consistentes con la revisión de Masiokas et al. (2020), quienes señalan que los glaciares andinos presentan un retroceso sostenido asociado al ascenso de la línea de nieve. Esta tendencia se refleja también en nuestras mediciones. En cuanto a las proyecciones, nuestro modelo hacia el año 2035 indica una reducción progresiva de la superficie glaciar, lo cual es congruente con lo propuesto por Huss y Hock (2018), quienes explican que muchas cuencas montanas están atravesando o atravesarán pronto el punto de pico de agua, seguido de una disminución marcada de la contribución glaciar. Del mismo modo, estamos de acuerdo con las conclusiones de Rounce et al. (2023), que proyectan pérdidas significativas incluso antes del 2035 bajo escenarios de calentamiento continuo, lo que respalda nuestras estimaciones para Pastoruri.

En relación con la actividad turística, los resultados muestran variaciones importantes en la afluencia de visitantes al Nevado Pastoruri a lo largo del periodo de estudio. El análisis de correlación simple realizado entre la superficie glaciar y el número de visitantes evidenció una relación inversa moderada ($r = -0.66$), lo que indica que, a medida que disminuye el área glaciar, la dinámica turística tiende a modificarse. Si bien esta relación no resultó estadísticamente significativa en términos estrictos ($p > 0.05$), la tendencia observada permite identificar una asociación clara entre la pérdida de cobertura glaciar y los cambios en el comportamiento turístico, especialmente en un contexto donde intervienen múltiples factores ambientales, sociales y de gestión.

En relación con la influencia de la actividad humana, coincidimos con el enfoque propuesto por Leal et al. (2023), quienes destacan que la actividad turística, cuando se gestiona bajo criterios de sostenibilidad, contribuye al desarrollo local sin generar impactos ambientales significativos. En el caso del Nevado Pastoruri, nuestros resultados indican que, durante los últimos años, la implementación de un modelo de turismo ha sido más sostenible, no obstante, reconocemos que en periodos de mayor afluencia turística pudo haber contribuido a acelerar procesos locales de degradación. Finalmente, coincidimos con Gordon (2023) en que el retroceso glaciar y los efectos del cambio climático sobre los destinos de montaña demandan estrategias de adaptación y diversificación de la oferta turística, orientadas a fortalecer la sostenibilidad y resiliencia de estos espacios ante la pérdida del hielo. Este autor señala que los destinos glaciares enfrentan impactos físicos y sociales del cambio climático, lo que impulsa la necesidad de adoptar medidas que incorporen nuevos productos turísticos, enfoques de gestión ambiental y educación al visitante para mantener la relevancia del turismo en contextos de cambio.

Asimismo, compartimos la visión de Portocarrero (2011), quien enfatiza la vulnerabilidad de los sistemas montanos frente al cambio climático y los riesgos asociados al retroceso de los glaciares en la Cordillera Blanca. Esta perspectiva se refleja claramente en la triple interacción que hemos identificado en nuestro estudio: retroceso glaciar intenso, disminución del turismo y proyecciones desfavorables hacia el año 2035, lo que confirma la necesidad de integrar estrategias de adaptación y gestión del riesgo en la planificación territorial de Pastoruri.

En conjunto, la comparación con estos diez autores demuestra que nuestros resultados son coherentes con las tendencias observadas en otros glaciares del mundo, tanto en términos de retroceso físico como en

impactos sobre la actividad turística y la disponibilidad hídrica. Las coincidencias encontradas permiten afirmar que Pastoruri responde a la misma dinámica generalizada de degradación glaciar, mientras que los puntos de desacuerdo resaltan las particularidades locales que deben considerarse en la gestión y planificación futura del área.

Conclusiones

El análisis multitemporal del Nevado Pastoruri evidenció un retroceso glaciar progresivo y sostenido durante el periodo 1987 al 2025, con una reducción de su superficie de 21,0996 km² a 10,9728 km², lo que confirma la elevada sensibilidad de los glaciares tropicales de la Cordillera Blanca. La pérdida acelerada de masa glaciar, ha modificado de manera significativa el paisaje glaciar. La proyección lineal al año 2035 indica la continuidad de este proceso de retracción, con una posible conservación inferior al 30 % de la superficie actual, lo que representa un escenario crítico para los ecosistemas de alta montaña y para la provisión de servicios ambientales.

Los resultados también evidencian que el retroceso glaciar ha influido en la dinámica de la actividad turística del Nevado Pastoruri, generando una transformación del tipo de turismo desarrollado en la zona. Si bien la reducción de la cobertura glaciar ha limitado el turismo convencional asociado al contacto directo con el hielo, se observa una reorientación hacia actividades de trekking, turismo de naturaleza y educación ambiental, manteniéndose el valor turístico del área. La integración del análisis espacial del retroceso glaciar con la información turística permitió comprender la relación entre ambas variables, destacando al Nevado Pastoruri como un espacio emblemático para la sensibilización sobre la pérdida de cobertura glaciar y como un referente para la gestión ambiental y el turismo sostenible en zonas de alta montaña.

Referencias

- Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. (2014). Inventario de glaciares y lagunas del Perú. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/inventario_de_glaciares_y_lagunas.pdf
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/glacier-recession-and-water-resources-in-perus-cordillera-blanca/5CEA7495D2BF050058A6B7280FE89A12>
- Bousbaa, M., Boudhar, A., Kinnard, C., Elyoussi, H., Karaoui, I., Eljabiri, Y., Bouamri, H., & Chehbouni, A. (2024). An accurate snow cover product for the Moroccan Atlas Mountains: Optimization of the MODIS NDSI index threshold and development of snow fraction estimation models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129, 103851. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156984322400205X>
- Bury, J. T., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., McKenzie, J. M., Baraer, M., French, A., & Polk, M. H. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1–2), 179–206. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1>
- Escate, A., & Zamora, F. (2021). El descenso del Pastoruri y su relación con el turismo: ¿Podemos obtener algo bueno de ello? Ministerio del Ambiente del Perú.
- Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12, 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- Fyke, J., Sergienko, O., Löfverström, M., Price, S., & Lenaerts, J. T. (2018). An overview of interactions and feedbacks between ice sheets and the Earth system. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 361–408. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018RG000600>
- Gerber, E., Fournier, J., Salim, E., Fragnière, E., & Kebir, L. (2025). Systems thinking to adapt tourism to climate change: Application to summer glacier skiing in Switzerland. *Annals of Tourism Research Empirical Insights*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666957925000072>
- Gordon, J. E. (2023). Climate change and geotourism: Impacts, challenges, and opportunities. *Geosciences*, 4(4), 32. <https://www.mdpi.com/2673-5768/4/4/32>
- Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Huss, M., & Zemp, M. (2019). GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, 65(251), 453–467. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.22>
- Hugonet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., ... & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2020). *Informe de la situación de los glaciares*

- y ecosistemas de montaña en el Perú 2020. INAIGEM. <https://hdl.handle.net/20.500.12748/647>
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (2023). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023 (INGLOG 2023)*. SINIA–Ministerio del Ambiente. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/inventario-nacional-glaciares-lagunas-origen-glaciar-2023>
- Jennings, S. J., & Hambrey, M. J. (2021). *Structures and deformation in glaciers and ice sheets. Reviews of Geophysics*, 59(3), e2021RG000743. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021RG000743>
- Leal, R., Velázquez, R., & Triana, J. (2023). *Actividad turística, su contribución al desarrollo local. Análisis de productividad científica en bases de datos*. Universidad y Sociedad, 15(6), 169–178. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202023000600169
- Masiokas, M. H., Rivera, A., Espízua, L. E., Solomina, O., & Villalba, R. (2020). A review of the current state and recent changes of the Andean cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8, 99. <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2020.00099/full>
- Maurer, J. M., Schaefer, J. M., Rupper, S., & Corley, A. (2020). Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. *Science Advances*, 5(6), eaav7266. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7266>
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. (s. f.). *Estadísticas de turismo*. <https://www.gob.pe/minetur>
- Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), & Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2023). *Monitoreo de glaciares tropicales busca mayor seguridad hídrica en el Perú*. <https://otca.org/monitoreo-de-glaciares-tropicales-busca-mayor-seguridad-hidrica-en-el-peru/>
- Pellicciotti, F., Ragettli, S., Carenzo, M., & McPhee, J. (2014). Changes in glacier mass balance and runoff from the Northern Patagonia Icefield from 1975 to 2011. *The Cryosphere*, 8(4), 1519–1541. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1519-2014>
- Pérez Forero, N. A. (2019). Ecoturismo de alta montaña: entre la conservación y el turismo. PNN Los Nevados, Sendero Conejeras. *Turismo y Sociedad*, (26), 155–171. <https://revistas.uexternado.edu.co/index.php/tursoc/article/view/6270>
- Portocarrero R., C. A. (2011). *El cambio climático, la glaciología y los riesgos en la Cordillera Blanca Ancash – Perú*. Aporte Santiaguino, 4(2), 208–215. http://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte_Santiaguino/article/view/547
- Pozada-Rengifo, R., Bravo-Toledo, L., & Iparraguirre, J. (2023). 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. *Tecnología y ciencias del agua*, 14(4), 1–27. <https://revstatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2985>
- Purdie, H. (2013). *Glacier retreat and tourism: Insights from New Zealand*. Mountain Research and Development, 33(4), 463–472. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00073.1>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., ... & Jordan, E. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Radić, V., Bliss, A., Beedlow, A. C., Hock, R., Miles, E., & Cogley, J. G. (2014). *Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios*. *Climate Dynamics*, 42(1–2), 37–58. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1719-7>
- Ragettli, S., Immerzeel, W. W., & Pellicciotti, F. (2016). Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(33), 9222–9227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1606526113>
- Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Watson, C. S., & Kennedy, M. (2021). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 11(12), 972–979. <https://www.nature.com/articles/s41558-020-0855-4>
- Soto, V. (2024). *La imposibilidad de pronosticar la extinción de un glaciar de montaña*. *Investigaciones Geográficas*, (114), e60921. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112024000200201
- Thomas, K., Hardy, R. D., Lazarus, H., Rockman, M., Warner, B. P., Rivera-Collazo, I., Roberts, J. T., & Orlove, B. (2019). *Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review*. *WIREs Climate Change*, 10(2), e565. https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcc.565?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article
- United States Geological Survey. (s. f.). *EarthExplorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global warming and tropical Andean glaciers: Observations, trends, and future scenarios. *Progress in Physical Geography*, 43(4), 540–567. <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/5/196>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., & Paul, F. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>

Contribución de los autores

NCC: elección del tema y diseño metodológico.

HLS: recolección de datos y redacción del artículo.

EGC: elaboración de mapas, análisis de resultados y revisión final del manuscrito.

FTS: revisión bibliográfica y elaboración de figuras y tablas.

Fuentes de financiamiento

La investigación fue realizada con recursos propios.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Aspectos éticos

Este estudio no involucró experimentación con seres humanos ni animales, por lo tanto, no requirió aprobación por comité de ética.

Correspondencia:Landa Santiago Hatzia Angelina
E-mail: hatzialanda@gmail.com