

DINÁMICA TEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA LOCAL EN LA CORDILLERA APOLOBAMBA, PERÚ

Wilber Laqui¹, Ricardo Zubieta²,
Yony Laqui-Vilca¹, Elmer Calizaya³,
César Laqui-Vilca⁴

¹ Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Puno, Perú.

² Instituto Geofísico del Perú (IGP), Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrosfera (SCAH), Lima, Perú.

³ Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Topográfica y Agrimensura, Puno, Perú.

⁴ Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Puno, Perú.



Es Ingeniero Agrícola, Magister Scientiae y Doctoris Philosophiae en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Desde 2019, se desempeña como docente asociado en la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano (UNAP). Ha publicado diversos artículos científicos relacionados a los recursos hídricos en el Altiplano.

Palabras clave: Puno, Cambio climático, Retroceso glaciar, Apolobamba, Perú

Citar como: Laqui, W., Zubieta, R., Laqui-Vilca, Y., Calizaya, E., Laqui-Vilca, C. (2025) Dinámica temporal del retroceso glaciar y su relación con el clima local en la Cordillera Apolobamba, Perú. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.o 04, págs. 4-11

¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para los tomadores de decisiones?*

Este estudio dispone de información acerca la dinámica del retroceso glaciar en la Cordillera Apolobamba ubicada en Puno. El estudio evidencia que el retroceso glaciar estaría principalmente impulsado por el calentamiento global. Ante posibles cambios futuros en el régimen de precipitación y la cobertura glaciar en contexto de periodos de sequía prolongada, se resalta la importancia de implementar medidas en la planificación regional, este es el caso de incrementar la disponibilidad hídrica estacional para la sostenibilidad de las actividades agrícolas y ganaderas.

Resumen

Los glaciares cumplen un papel fundamental como fuentes de agua para la población en zona alto-andinas, y el monitoreo de su dinámica resulta esencial para comprender los efectos del cambio climático. Este artículo es una adaptación del paper "Temporal dynamics of glacier retreat and its

relationship with local climate in Cordillera Apolobamba, Peru" (Laqui et al., 2023), el cual presenta una evaluación integral de la dinámica temporal del retroceso glaciar y su relación con el clima local en la Cordillera Apolobamba (CA), ubicada en Perú, entre 1986-2015. A partir de imágenes satelitales Landsat y el uso del Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI, por sus

siglas en inglés), se cuantificaron los cambios en la cobertura glaciar en intervalos de cinco años, y se analizó su relación con variables climáticas. Los resultados evidencian una tendencia notable y alarmante en la evolución temporal de las áreas glaciares en la CA. Para 2015, el retroceso glaciar alcanzó una pérdida acumulada de 51.84% con respecto a la superficie glaciar estimada en 1986, con una tasa media de pérdida anual de 0,79 km² por año. Asimismo, se identificaron relaciones directas e inversas entre la precipitación, la temperatura y la tasa de retroceso glaciar. Nuestros resultados sugieren que la temperatura es el factor predominante en la reducción del área glaciar, mientras que la tasa de retroceso está condicionada por la precipitación. Estos hallazgos ofrecen evidencia clave para los responsables de la formulación de políticas, actores involucrados y la comunidad científica. Dada las posibles implicaciones futuras a la población ante la disminución del recurso hídrico.

1. Introducción

Los glaciares almacenan aproximadamente el 70 % del agua dulce del planeta, estimadas en unos 24 millones de km³ (Liu et al., 2013), y constituyen una fuente hídrica fundamental para cerca del 20 % de la población mundial (Rittger et al., 2013). Su retroceso continuo está generando impactos significativos en la disponibilidad de agua dulce, afectando ecosistemas, poblaciones humanas, agricultura e industria, especialmente en regiones dependientes del deshielo glaciar (Kaser et al., 2003; Liu et al., 2013; Rittger et al., 2013; Satir, 2016; Vuille, Francou, et al., 2008). Además, la disminución de la escorrentía proveniente del glaciar puede provocar pérdidas económicas y procesos de migración de la población (Petraikov et al., 2016; Takeuchi et al., 2014).

En los Andes tropicales, el retroceso de los glaciares constituye un claro indicador del cambio climático (Turpo et al., 2022). Esta región alberga el 99 % de los glaciares tropicales del mundo, particularmente en su zona central (Liu et al., 2013), mientras que el 71 % se encuentra en Perú (López-Moreno et al., 2014), donde estos glaciares cumplen un rol clave en la provisión de recursos hídrico durante la estación seca (Vuille, Kaser, et al., 2008). Desde la década de 1970, el retroceso de los glaciares andinos se ha acelerado, impulsado por el aumento de la temperatura del aire (Mark & Seltzer, 2005; Petraikov et al., 2016; Schauwecker et al., 2014; Vuille, Francou, et al.,

2008; Wang et al., 2015). Entre 1970 y 1997, Perú perdió más del 20 % de su superficie glaciar (Fraser, 2012).

Dado que los glaciares son indicadores altamente sensibles del cambio climático (Burns & Nolin, 2014; Carey et al., 2014; Emmer et al., 2015; Liu et al., 2013), su monitoreo es esencial. La teledetección se ha consolidado como una herramienta eficaz para estimar la extensión y evolución de los glaciares (Durán-Alarcón et al., 2015), permitiendo análisis regionales integrales de la dinámica glaciar y del balance de masa (Bamber & Rivera, 2007). Diversos estudios han empleado la teledetección para analizar la pérdida de cobertura glaciar (Burns & Nolin, 2014; Dobrevá & Klein, 2011; Gupta et al., 2005; Immerzeel et al., 2009; Nijhawan et al., 2016; y Silverio & Jaquet, 2005).

En Perú, diversos estudios han documentado la pérdida de la cobertura glaciar en distintas cordilleras, como la Blanca, para la cual Silverio & Jaquet (2005) determinaron que la Cordillera Blanca perdió 43 km² entre 1987 y 1996 (6.7 %) y 121 km² entre 1970 y 1996 (15%). En otro estudio, realizado por Zubieta and Lagos (2010) determinaron que entre 1976 y 2006, la Cordillera Huaytapallana perdió el 59.4 % de su superficie glaciar. En otro trabajo de investigación sobre el el glaciar Quisoquipina, los autores determinaron que se redujo el área glaciar en 10.9% entre 1990 y 2010 (Suarez et al., 2015).

La Cordillera Apolobamba (CA) entre 1986 y 2014 ha perdido 43.1% de su cobertura glaciar (Cook et al., 2016). El acelerado retroceso de los glaciares tropicales y los cambios proyectados en la hidrología regional requieren mayor investigación para comprender su interacción con el clima y la hidrología. Este estudio tiene como objetivo cuantificar la superficie glaciar en la Cordillera Apolobamba para el periodo 1986 y 2015, analizar su dinámica de su retroceso y evaluar su relación con la temperatura y la precipitación, principales impulsores climáticos para el retroceso glaciar.

2. Datos y metodología

2.1 Área de estudio

La Cordillera Apolobamba (CA) se ubica en el sureste de los Andes peruanos, dentro del departamento de Puno, entre las coordenadas 14°25'–14°44' S y 69°13'–69°32' O (Fig. 1). Su pico más alto es el monte Ananea, con una altitud de 5 800 m s. n. m. La región norte de la cordillera alimenta los ríos Huari Huari e Inambari, que son afluentes de la Región Hidrográfica del Atlántico, mientras que la vertiente sur drena hacia los ríos Carabaya y Trapiche, dentro de la Región Hidrográfica del Titicaca.

Según la Autoridad Nacional del Agua (2014), en esta cordillera se identificaron 69 glaciares en la región, cubriendo 45.25 km² en 2014, lo que representa una reducción del 45.43% desde 1970. La mayoría de los glaciares están orientados hacia el sur-sureste (42.65 %). El clima de la zona se caracteriza por una marcada temporada de lluvias entre octubre-abril, y un periodo seco o de mínimas precipitaciones entre mayo y septiembre. La precipitación media anual es de 606 mm, de los cuales solo el 8.5 % ocurre en la estación seca, mientras que la temperatura media anual es de 5.8°C.

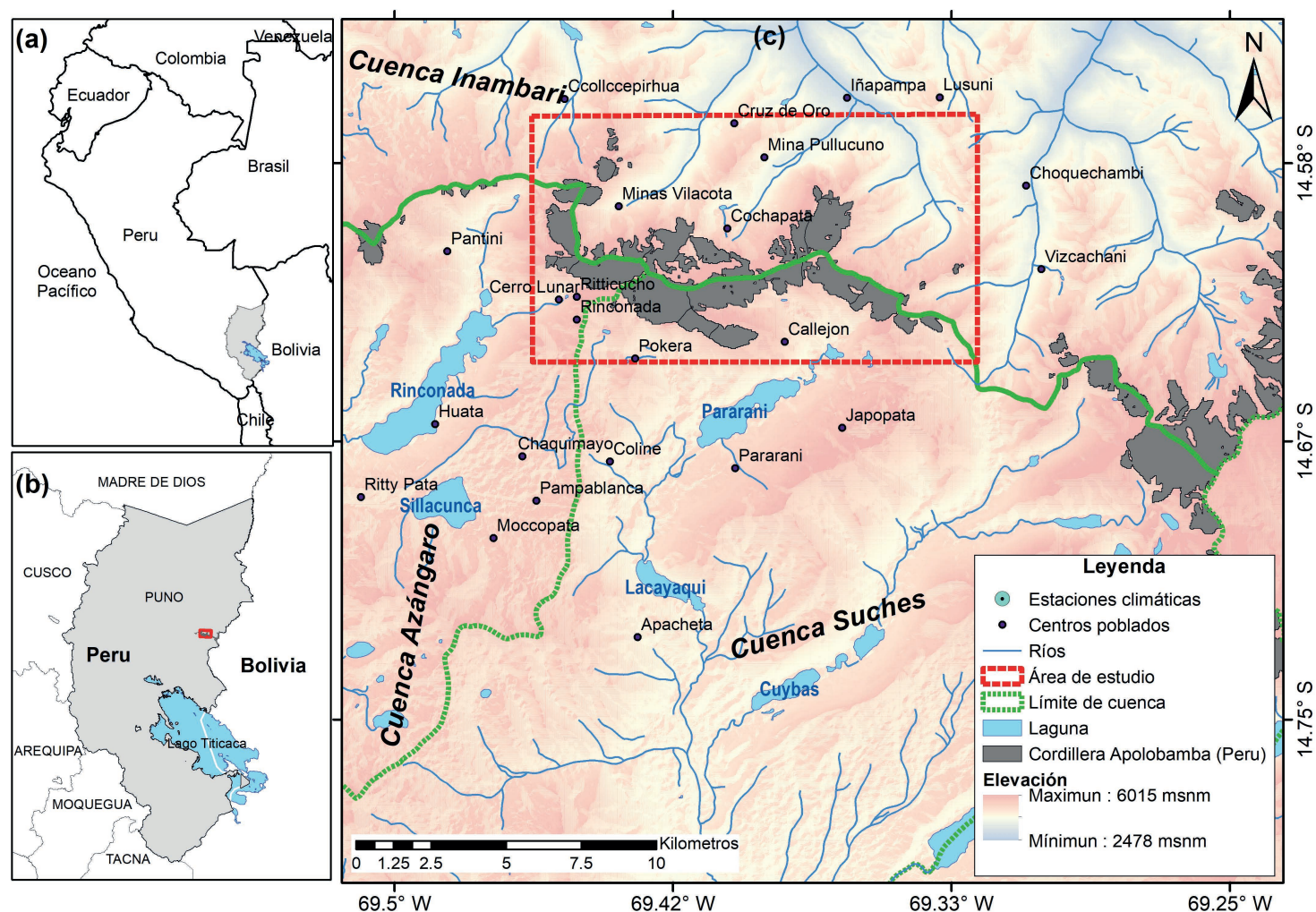


Figura 1. a) Ubicación de la región Puno en América del Sur, b) Ubicación de la Cordillera Apolobamba en la región Puno, y c) Área de estudio en la Cordillera Apolobamba.

2.2 Datos satelitales

Se utilizaron imágenes de los sensores Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI, obtenidas del USGS (<http://glovis.usgs.gov>), correspondientes a los años 1986, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015. Las imágenes tienen una resolución espacial de 30 m y bandas espectrales en el visible e infrarrojo (Satir, 2016). Se priorizaron imágenes satelitales registradas durante la estación seca (junio-agosto) con una cobertura nubosa menor al 10% (López-Moreno et al.,

2014; Paul et al., 2002). Imágenes de la estación húmeda de 1990, 1995 y 2015 se seleccionaron imágenes por presentar mejores condiciones de visibilidad. Las imágenes corregidas geométricamente (Burns & Nolin, 2014; Satir, 2016), fueron proyectadas al sistema WGS 84 zona 19 S en QGIS. Posteriormente, se realizó la combinación de bandas en ERDAS Imagine 2014 para generar imágenes con niveles de reflectividad (ERDAS, 2014; Nijhawan et al., 2016).

Tabla 1. Cambios en la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba para el periodo 1986–2015.

Año	Periodo	Área de cobertura glaciar (km ²)	Cambio de área (km ²)	Tasa de cambio de área (%)	Tasa de retroceso (km ² /año)
1986	1986-1990	45.97	-8.21	-17.86	-2.05
1990	1990-1995	37.76	-4.59	-12.16	-0.92
1995	1995-2000	33.17	-2.17	-6.54	-0.43
2000	2000-2005	31.00	-3.88	-12.52	-0.78
2005	2005-2010	27.12	-4.39	-16.19	-0.88
2010	2010-2015	22.73	-0.59	-2.60	-0.12
2015	1986-2015	22.14	-23.83	-51.84	-0.79

Nota: El cambio de área se obtiene restando el área total de dos periodos vecinos.

2.3 Área de cobertura de nieve

La detección de nieve y hielo se realizó mediante el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) (Dozier, 1989) en ERDAS Imagine 2014. Se establecieron límites de NDSI entre 0.40 y 0.55, en concordancia con estudios previos (Burns & Nolin, 2014; Crawford et al., 2013; Durán-Alarcón et al., 2015; Silverio & Jaquet, 2005). Asimismo, se descartaron polígonos menores a 0.005 km² y aquellos por debajo de 4 000 m s. n. para evitar errores de clasificación (Burns y Nolin, 2014; Autoridad Nacional del Agua, 2014). La ecuación del NDSI se define en la relación entre la banda visible (TM2) y el infrarrojo medio (TM5), según la ecuación de Landsat (Thapliyal et al., 2023).

$$NDSI = \frac{(TM2 - TM5)}{(TM2 + TM5)}$$

3. Resultados y discusión

3.1 Variación en la cobertura glaciar

Entre 1986 y 2015, la superficie glaciar en la CA se redujo de manera significativa, pasando de 45.97 km² a 22.14 km², lo que representa una pérdida de 23.83 km²; es decir, el 51.84 % de la superficie glaciar en un lapso de 30 años (Tabla 1, Fig. 2). La tasa de retroceso no fue uniforme en todos

los periodos analizados, destacándose una correlación inversa significativa ($r^2 = 0.94$) entre la tendencia lineal y la superficie de cobertura glaciar en la CA (Fig. 3).

La mayor pérdida de cobertura glaciar ocurrió en la cuenca del Azángaro, donde el frente del glaciar La Rinconada retrocedió aproximadamente 328 m y se observó la fragmentación del glaciar Ananea (Fig. 2). Asimismo, se evidenció un retroceso significativo en los glaciares de las cuencas del Inambari y Suches, con una disminución de cobertura y desaparición de masas de hielo.

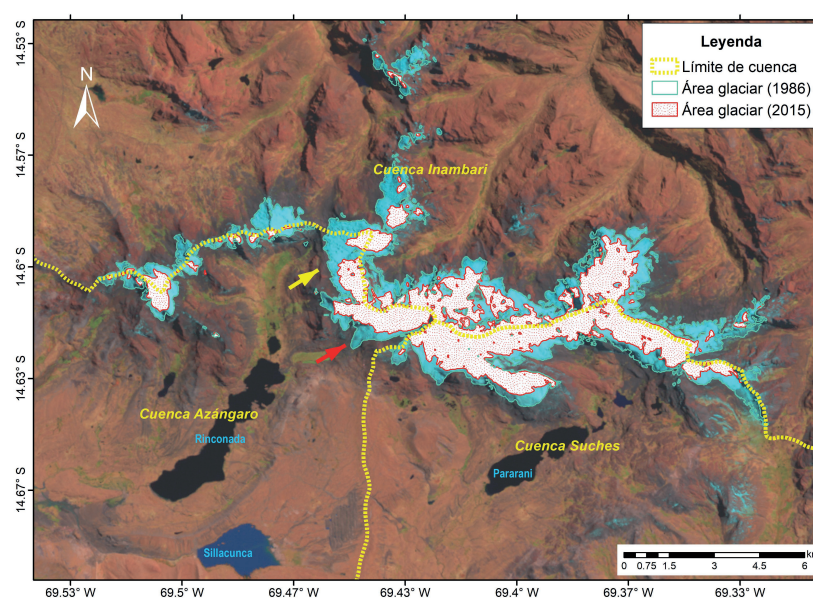


Figura 2. Cambios en la cobertura glaciar de la cordillera Apolobamba para el periodo 1986-2015. La imagen satelital (al fondo) corresponde al área glaciar en 1986 (las fechas en amarillo y rojo indican la ubicación de los glaciares Ananea y Rinconada, respectivamente).

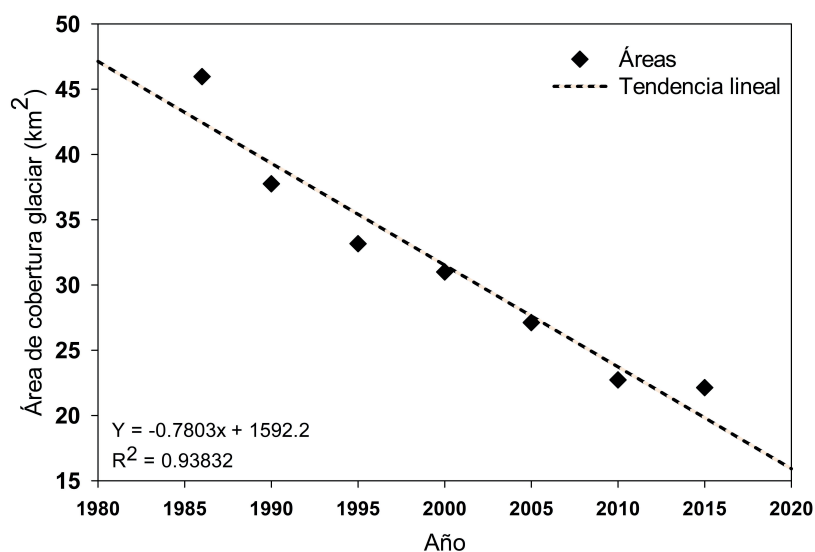


Figura 3. Retroceso de cobertura glaciar en la cordillera Apolobamba entre 1986 y 2015 y su tendencia lineal.

El análisis de la relación entre la cobertura glaciar y las variables climáticas locales se realizó utilizando datos de precipitación y temperatura registrados en la estación meteorológica de Ananea entre 1981 y 2015 (Fig. 4). Se observó una reducción gradual en la precipitación anual y un aumento progresivo de la temperatura media anual, mostrando una relación inversa con la dinámica de la cobertura glaciar. El análisis de la tasa de retroceso glaciar y la precipitación revela dos patrones distintos (Fig. 5). Entre 1986 y 2005, se identificó una relación directa, donde mayores precipitaciones coincidieron con tasas de retroceso glaciar más elevadas. En contraste, entre 2005 y 2015, se presentó una relación inversa, con tasas de retroceso más altas en años de menor precipitación. Si bien no se encontró una relación directa entre la tasa de retroceso glaciar y la temperatura media anual en cada periodo, en general, se identificó una relación inversa entre las tendencias de ambas variables, sin condicionar las tasas de pérdida de cobertura glaciar. Estos resultados sugieren que el retroceso glaciar está principalmente influenciado por el incremento de la temperatura y el calentamiento global, lo cual ha sido documentado en varias investigaciones (Lopez et al., 2010; López-Moreno et al., 2014; Mark & Seltzer, 2005; Petrakov et al., 2016; Schauwecker et al., 2014; Wang et al., 2015), mientras que la precipitación condiciona la tasa de retroceso glaciar. Este fenómeno es también registrado en el Qinghai-Tibet Plateau (Pan et al., 2012) y en los glaciares del Himalaya (Zhao et al., 2020) debido al efecto del albedo sobre el balance de radiación de onda corta (Azam et al., 2018). Además, las tasas de pérdida de cobertura glaciar también estarían asociadas a la geometría de los glaciares, como la elevación, orientación y pendiente (Ganjoo & Koul, 2025), factores que no fueron abordados en esta investigación.

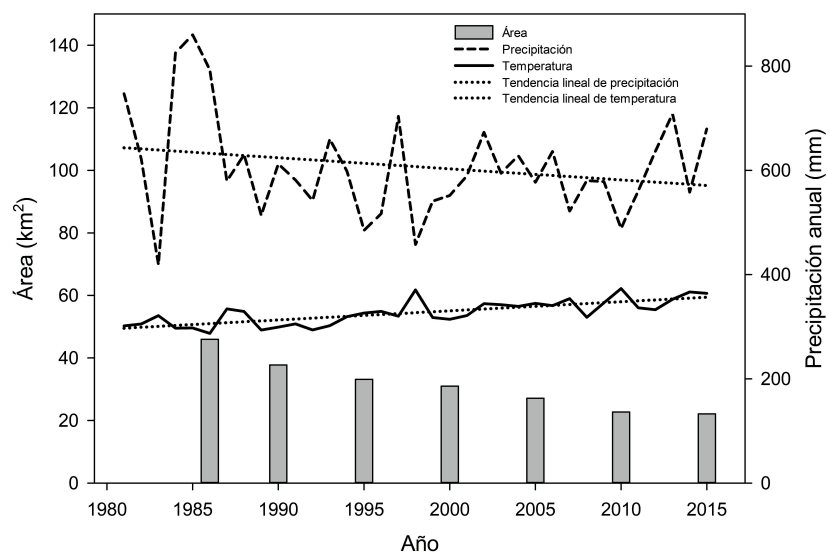


Figura 4. Superficie glaciar y datos meteorológicos para el período 1981-2015.

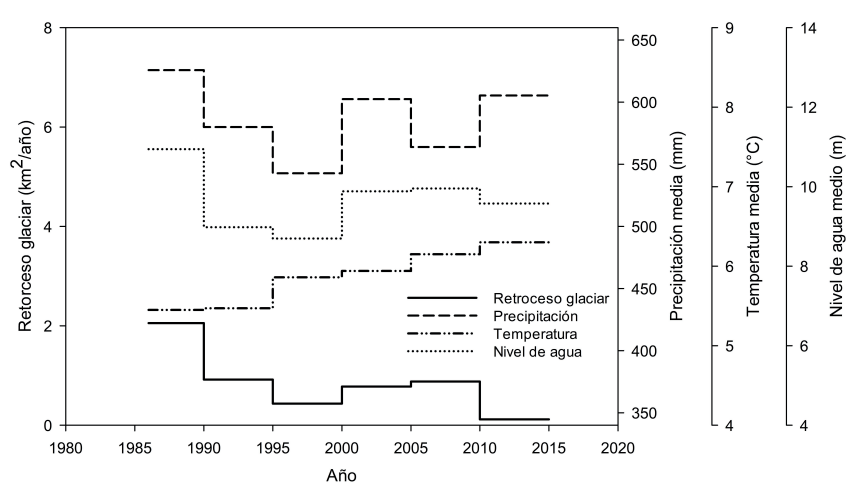


Figura 5. Relación entre la tasa de retroceso de los glaciares y las variables climáticas locales

Las respuestas de los glaciares a los cambios climáticos son complejas (Zhao et al., 2020). Por ello, los aumentos observados en la temperatura y las variaciones en la precipitación en la Cordillera Apolobamba no explican por sí solos el pronunciado retroceso glaciar registrado durante los últimos 30 años. Según Schauwecker et al. (2014), para que se produzca un retroceso sostenido como el observado, se requeriría un incremento térmico superior a 0.3°C por década, umbral que no fue alcanzado en ninguno de los periodos analizados. Esto sugiere que la influencia de otros factores, como el tamaño, la orientación y la altitud de los glaciares (Ahmad et al., 2022). Asimismo, presiones antropogénicas como las actividades como la minería en La Rinconada, incluida la extracción forzada de agua mediante la inducción del derretimiento del hielo por modificación del albedo para el abastecimiento de las operaciones mineras y de la población, podrían estar contribuyendo a la reducción de la cobertura glaciar (Autoridad Nacional del Agua, 2015).

4. Conclusiones

Este estudio evaluó la dinámica del retroceso glaciar en la Cordillera Apolobamba (CA) utilizando imágenes satelitales Landsat y el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI). Se identificó una reducción significativa de la cobertura glaciar entre 1986 y 2015, equivalente a una pérdida total de 22.14 km² (51.84 %), a una tasa de 0.79 km²/año. Asimismo, se observó una disminución progresiva de la precipitación anual y un leve aumento de la temperatura del aire. El análisis evidenció una relación directa entre la precipitación y la tasa de retroceso glaciar en el periodo 1986–2005, y una relación inversa en 2005–2015. Estos resultados sugieren que, si bien el retroceso glaciar en la región analizada está principalmente impulsado por el calentamiento global, la magnitud de dicha pérdida está modulada por la disponibilidad de precipitación.

Referencias

- Ahmad, S. T., Ahmed, R., Wani, G. F., Sharma, P., & Ahmed, P. (2022). Glacier changes in Sind basin (1990–2018) of North-western Himalayas using earth observation data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 2567-2579. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01246-w>
- Autoridad Nacional del Agua - [ANA]. (2014). Inventario nacional de glaciares y lagunas. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/199>
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). Informe del estado situacional del glaciar Riticucho. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos.
- Azam, M. F., Wagon, P., Berthier, E., Vincent, C., Fujita, K., & Kargel, J. S. (2018). Review of the status and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers. *Journal of Glaciology*, 64(243), 61-74. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.86>
- Bamber, J. L., & Rivera, A. (2007). A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.031>
- Cook, S. J., Kougkoulos, I., Edwards, L. A., Dortch, J., and Hoffmann, D. (2016). Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. *The Cryosphere*, 10, 2399–2413. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2399-2016>
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165-178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.026>
- Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R., & McKenzie, J. M. (2014). Toward hydro-social modeling: Merging human variables and the social sciences with climate-glacier runoff models (Santa River, Peru). *Journal of Hydrology*, 518, 6070. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.006>
- Crawford, C. J., Manson, S. M., Bauer, M. E., & Hall, D. K. (2013). Multitemporal snow cover mapping in mountainous terrain for Landsat climate data record development. *Remote Sensing of Environment*, 135, 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.004>
- Dobreva, I. D., & Klein, A. G. (2011). Fractional snow cover mapping through artificial neural network analysis of MODIS surface reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3355-3366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.018>
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Durán-Alarcón, C., Gevaert, C. M., Mattar, C., Jiménez-Muñoz, J. C., Pasapera-Gonzales, J. J., Sobrino, J. A., Silvia-Vidal, Y., Fashé-Raymundo, O., Chavez-Espiritu, T. W., & Santillan-Portilla, N. (2015). Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*, 59, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.006>
- Emmer, A., Loarte, E. C., Klimeš, J., & Vilímek, V. (2015). Recent evolution and degradation of the bent Jatunraju glacier (Cordillera Blanca, Peru). *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 228, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.018>
- ERDAS. (2014). ERDAS imagine 2014. Hexagon Geospatial, Peachtree Corners Circle Norcross.
- Fraser, B. (2012). Melting in the Andes: Goodbye glaciers. *Nature (London)*, 491(7423), 180–182. <https://doi.org/10.1038/491180a>
- Ganjoo, R. K., & Koul, M. N. (2025). Glacier Geometry and Dynamics. En R. K. Ganjoo & M. N. Koul, *The Himalayan Glaciers, Climate Change and Society* (pp. 65-101). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78283-1_4

- Gupta, R. P., Haritashya, U. K., & Singh, P. (2005). Mapping dry/wet snow cover in the Indian Himalayas using IRS multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 97(4), 458-469.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.010>
- Immerzeel, W. W., Droogers, P., De Jong, S. M., & Bierkens, M. F. P. (2009). Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 40-49.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.010>
- Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Gómez, J., & Tamayo, W. (2003). The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Perú. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 130-144.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00259-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00259-2)
- Laqui, W., Zubieta, R., Laqui-Vilca, Y., Calizaya, E., & Laqui-Vilca, C. (2023). Temporal dynamics of glacier retreat and its relationship with local climate in Cordillera Apolobamba, Peru. *Modeling Earth Systems and Environment*. 10(2), 1647-1656.
<https://doi.org/10.1007/s40808-023-01865-5>
- Liu, T., Kinouchi, T., & Ledezma, F. (2013). Characterization of recent glacier decline in the Cordillera Real by LANDSAT, ALOS, and ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 137, 158-172.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.010>
- Lopez, P., Chevallier, P., Favier, V., Pouyaud, B., Ordenes, F., & Oerlemans, J. (2010). A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America. *Global and Planetary Change*, 71(1-2), 85-108.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.12.009>
- López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Zubieta, R., & Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20-21), 2265-2280.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.01.003>
- Nijhawan, R., Garg, P. K., & Thakur, P. K. (2016). Monitoring of glacier in Alaknanda basin using remote sensing data. *Perspectives in Science*, 8, 381-383.
<https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.081>
- Pan, B. T., Zhang, G. L., Wang, J., Cao, B., Geng, H. P., Wang, J., Zhang, C., & Ji, Y. P. (2012). Glacier changes from 1966-2009 in the Gongga Mountains, on the south-eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and their climatic forcing. *The Cryosphere*, 6(5), 1087-1101.
<https://doi.org/10.5194/tc-6-1087-2012>
- Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., Kellenberger, T., & Haeberli, W. (2002). The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 34, 355-361.
<https://doi.org/10.3189/172756402781817941>
- Petrakov, D., Shpuntova, A., Aleinikov, A., Kääb, A., Kutuzov, S., Lavrentiev, I., Stoffel, M., Tutubalina, O., & Usabaliev, R. (2016). Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003-2013. *Science of The Total Environment*, 562, 364-378.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.162>
- Rittger, K., Painter, T. H., & Dozier, J. (2013). Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Advances in Water Resources*, 51, 367-380.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.002>
- Satir, O. (2016). Comparing the satellite image transformation techniques for detecting and monitoring the continuous snow cover and glacier in Cilo mountain chain Turkey. *Ecological Indicators*, 69, 261-268.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.032>
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85-97.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>
- Silverio, W., & Jaquet, J.-M. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342-350.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>
- Suarez, W., Macedo, N., Montoya, N., Arias, S., Schauwecker, S., Huggel, C., & Condom, T. (2015). Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010). *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)*, 4, 80-92.
<https://doi.org/10.5167/uzh-118200>
- Takeuchi, N., Fujita, K., Aizen, V. B., Narama, C., Yokoyama, Y., Okamoto, S., Naoki, K., & Kubota, J. (2014). The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene.

Quaternary Science Reviews, 103, 26-33.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.006>

Thapliyal, A., Kimothi, S., Taloor, A. K., Bisht, M. P. S., Mehta, P., & Kothiyari, G. C. (2023). Glacier retreat analysis in the context of climate change impact over the Satopanth (SPG) and Bhagirathi-Kharak (BKG) glaciers in the Mana basin of the Central Himalaya, India: A geospatial approach. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(1), 100128.
<https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100128>

Turpo, E. Y., Borja, M. O., Espinoza-Villar, R., Moreno, N., Camargo, R., Almeida, C., Hopfgartner, K., Yarleque, C., & Souza, C. M. (2022). Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(9), 1974.
<https://doi.org/10.3390/rs14091974>

Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79-96.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>

Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62(1-2), 14-28.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.003>

Wang, P., Li, Z., Zhou, P., Wang, W., Jin, S., Li, H., Wang, F., Yao, H., Zhang, H., & Wang, L. (2015). Recent changes of two selected glaciers in Hami Prefecture of eastern Xinjiang and their impact on water resources. *Quaternary International*, 358, 146-152.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.05.028>

Zhao, X., Wang, X., Wei, J., Jiang, Z., Zhang, Y., & Liu, S. (2020). Spatiotemporal variability of glacier changes and their controlling factors in the Kanchenjunga region, Himalaya based on multi-source remote sensing data from 1975 to 2015. *Science of The Total Environment*, 745, 140995.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140995>

Zubieta, R., & Lagos, P., 2010. Cambios de la superficie glaciar en la cordillera Huaytapallana: periodo 1976–2006. En: *Cambio climático en la cuenca del río Mantaro: Balance de 7 años de estudio en la cuenca del Mantaro* (pp. 59-67). Instituto Geofísico del Perú .
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/710>