

MONITOREO DE GLACIARES POR TAMAÑO Y SU IMPACTO EN LA RESERVA HÍDRICA EN LOS ANDES DEL PERÚ

Monitoring glaciers by size and its impact on water reserves in the Peruvian Andes

Arnaldo A. Tacsí^{1, 2*}, Thomas Condom³, Abel Mejía², María Cardenas-Gaudry^{2, 4}

¹Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas (SCGL) Autoridad
Nacional del Agua (ANA), Huaraz, 02001, Perú.

²Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, 15024, Perú.

³Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS; INRAe, Grenoble-INP, Institut des Geosciences
de l'Environnement (IGE, UMR 5001), Grenoble, 38580, Francia.

⁴Universidad Científica del Sur, Villa, 15842, Perú.

Identificador ORCID de los autores y e-mail

Arnaldo A. Tacsí: ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4125-6155>. atacsi@ana.gob.pe

Abel Mejía: ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-3898>. jabel@lamolina.edu.pe

Thomas Condom: ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-8580>. thomas.condom@ird.fr

María Cardenas Gaudry: ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1053-8456>. mcardenasga@cientifica.edu.pe

*Autor corresponsal: atacsi@ana.gob.pe

Recibido: 28-07-2024. **Aceptado:** 26-05-2025. **Fecha de publicación on-line:** 10-10-2025

Citation/Cómo citar este artículo: Tacsí, A. A., Condom, T., Mejía, A., Cardenas-Gaudry, M., (2025). Monitoreo de glaciares por tamaño y su impacto en la reserva hídrica en los Andes del Perú. *Pirineos*, 180 e089. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2025.180.364>

RESUMEN: En casi 58 años analizados, el comportamiento de la cantidad de población que utiliza el recurso hídrico proveniente del glaciar tropical presenta una relación inversa, provocando un incremento del déficit de agua en las cuencas glaciares. Por ello es necesario un análisis exhaustivo reciente de los glaciares tropicales. El estudio se realizó para las cordilleras de los Andes peruanos del año (1962 y 2020) para conocer el estado de conservación de los glaciares (superficie y volumen), la distribución (5 tamaños de glaciares y 3 zonas de los Andes) y la reserva hídrica del hielo per cápita por habitantes. La metodología fue utilizar las fotografías aéreas e imágenes (Sentinel y Spot) para identificar los glaciares y validarla con puntos de GPS en algunos glaciares, DEM para el modelo de GlabTop que calcula el volumen de glaciares y los censos poblacionales en la demarcación de los distritos con presencia de glaciares. Los resultados muestran que la superficie y volumen en año 1962 (2.349,20 km² y 69.564 h m³) y en año

2020 (1.049 km² y 31.686 hm³), ocupando mayor masa glaciar en los Andes Centrales y Andes del Norte. Y a la vez, presenta al año 2020 una evidencia de disminución significativa en superficie (55 %) y volumen (54 %), con una concentración de 86 % en cantidad de glaciares de tamaño < 1 km². Respecto a la población y la reserva hídrica hielo per cápita, aumentó de más 650.000 habitantes a 1.200.000 habitantes, y se reduce de 106,66 m³ por habitante a 24,85 m³ por habitante, respectivamente. Los cambios decrecientes en los tamaños de glaciares situados en los Andes peruanos requieren la importancia de un monitoreo continuo y la necesidad de gestionar adecuadamente estos recursos vulnerables en una población creciente continua.

PALABRAS CLAVE: Cordillera en Andes, glaciares de montaña, teledetección, reserva glaciar per cápita, tamaño glaciar.

ABSTRACT: In almost 58 years analyzed, the behavior of the amount of population using the water resource coming from the tropical glacier presents an inverse relationship, causing an increase of the water deficit in the glacier basins. Therefore, a recent comprehensive analysis of tropical glaciers is necessary. The study was carried out for the Peruvian Andes mountain ranges of the year (1962 and 2020) to know the conservation status of glaciers (surface and volume), distribution (5 sizes of glaciers and 3 zones of the Andes) and ice water reserve per capita per inhabitant. The methodology was to use aerial photographs and images (Sentinel and Spot) to identify glaciers and validate it with GPS points on some glaciers, DEM for the GlabTop model that calculates the volume of glaciers and population censuses in the demarcation of the districts with presence of glaciers. The results show that the surface and volume in 1962 (2,349.20 km² and 69,564 hm³) and in 2020 (1,049 km² and 31,686 hm³), occupying more glacier mass in the Central Andes and Northern Andes. At the same time, there is evidence of a significant decrease in surface area (55 %) and volume (54 %) by 2020, with a concentration of 86 % in the number of glaciers of size < 1.0 km². Regarding population and ice water reserve per capita, it increased from over 650,000 inhabitants to 1,200,000 inhabitants, and decreased from 106,660 m³/inhabitant to 24,858 m³/inhabitant, respectively. The decreasing changes in the sizes of glaciers located in the Peruvian Andes require the importance of continuous monitoring and the need to adequately manage these vulnerable resources in a continuously growing population.

KEYWORDS: Andes mountain range, mountain glaciers, remote sensing, glacier reserve per capita, glacier size.

1. Introducción

Los glaciares (masas de hielo que se caracterizan por tener movimiento debido a la acción de la gravedad) que están situados en las regiones de alta montaña son importantes en el contexto de cambio climático y en el desarrollo sostenible de la población que depende de ellos directa o indirectamente (Hock et al., 2019). Estos recursos hídricos en estado sólido en territorio peruano se almacenan en cadenas de montañas situadas en tres zonas (Andes del Norte, Andes Centrales y Andes del Sur) y representan el 75 % de superficie en América del Sur (Rivera et al., 2017). Desde el siglo XX hasta la actualidad, las masas glaciares presentan un retroceso progresivo (Mark y Seltzer, 2005); debido al incremento de temperatura asociado al cambio climático (IPCC, 2007; Hastenrath, 1994) generando la disminución de las masas de hielo, que producen alteración hidrológicas (Hugonnet et al., 2021; Schoolmeester et al., 2018); provocando en las zonas rurales menos contribución de la fusión del glaciar a los valles andinos ubicadas en la cabecera de cuencas (Condom et al., 2012; Tacsí et al., 2021), siendo más notorio en los meses de temporada seca (Baraer et al., 2012) y las comunidades próximos a los nevados, atinan con preocupación (Bury et al., 2011; Berrouet et al., 2020); porque, limita su desarrollo de las poblaciones andinas a través de usos agrícolas, municipales, así como la generación de energía hidroeléctrica (Bury et al., 2011; Carey et al., 2013; Drenkhan et al., 2015). Por otro lado, las zonas urbanas que son abastecidas por el deshielo han presentado un crecimiento demográfico, significando un aumento de la demanda de agua y una reducción de las reservas hidrológicas (Martín Murillo et al., 2018). Respecto a los tamaños de glaciares (superficie y volumen), se han producido cambios diferenciados en 57 años (Tacsí et al., 2022). Este comportamiento de glaciares en el tiempo ha generado cambios significativos de las dimensiones morfométricas (AEGL-ANA, 2021); por la tendencia de calentamiento global desde principio de la década de 1980 de 0,13 °C/década (Schauwecker et al., 2014), causando una dramática pérdida promedio de hielo glacial de 0,76 m eq.a.año⁻¹ en altitudes superiores a 5.400 m s.n.m. entre los años 1976 a 2010 (Rabatel et al., 2013). El objetivo del estudio es analizar temporalmente las variaciones de superficie y volumen, considerando 5 clases de tamaño de glaciares y beneficio del glaciar por habitantes en un intervalo de 58 años ubicadas en los Andes (Norte, Centrales y Sur). Para lo cual se realizó como subobjetivos: 1) la identificación de los glaciares en las imágenes de satélite, 2) la estimación de las dimensiones del glaciar en términos de área y volumen, 3) la determinación de la cantidad de población de los distritos con glaciares.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Los glaciares tropicales peruanos se localizan en la cadena montañosa de los Andes, dividida en tres zonas: Andes del Norte (frontera Ecuador hasta nudo de Pasco), Andes Centrales (nudo de Pasco - nudo de Vilcanota) y Andes del Sur (nudo de Vilcanota hasta frontera Bolivia) (Figura 1). Estas zonas están conformadas por ramales denominados cordilleras (Occidental, Central y Oriental) separados por extensos valles interandinos y cauces de numerosos ríos que drenan hacia las vertientes del Pacífico, Atlántico y Titicaca. En ciertas áreas donde las altitudes son elevadas en los Andes del Perú y el clima es predominantemente frío, han permitido la formación de glaciares agrupados en 19 cordilleras nevadas, que se extienden desde los 8° 23' S hasta los 15° 49' S en Perú, continuando hacia el sur del país en Bolivia (Hidrandina, 1989; AEGL-ANA, 2021). Además, las cordilleras Huanzo, Ampato, Chila y Volcánica están en trópicos exteriores secos y el resto de cordilleras en trópicos exteriores húmedos (Veettil et al., 2016).

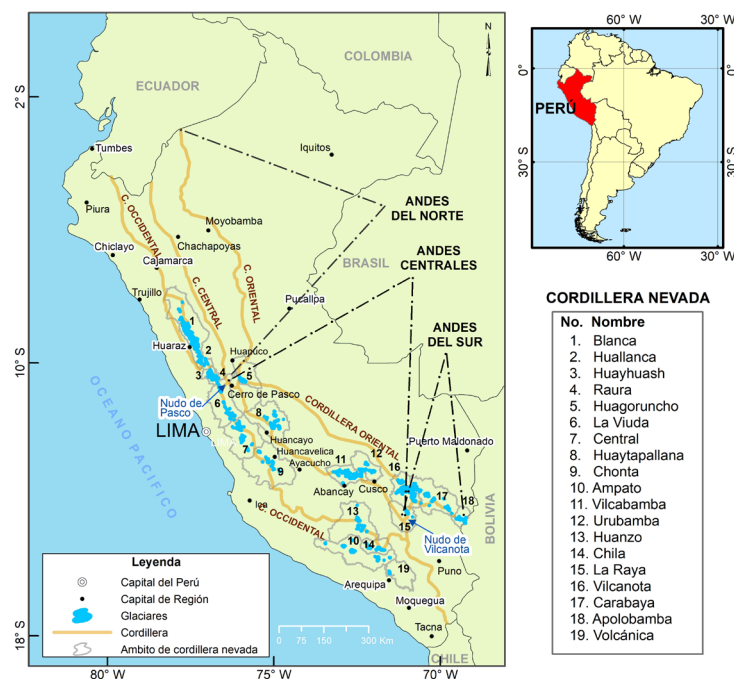


Figura 1. Ubicación de glaciares en las diferentes cordilleras de los Andes (Norte, Centrales y Sur). adaptado de Hidrandina, 1989.

Figure 1. Location of glaciers in the different mountain ranges of the Andes (North, Central and South) adapted from Hidrandina, 1989.

2.2. Información disponible

2.2.1. Imágenes digitales

El análisis del comportamiento temporal de los glaciares se realizó utilizando imágenes de satélite y fotografías aéreas. Las imágenes de satélite utilizadas son datos de Landsat 7 y 8 (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) de resolución de 30 m y Sentinel-2A y 2B (<https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>) de resolución de 10 m, todas accesibles de manera gratuita. Además, se utilizaron las imágenes Spot 6 y Spot 7 de resolución de 5 m proporcionadas por la Agencia Espacial del Perú (CONIDA) e imágenes de SAS Planet (<https://www.sasgis.org/>) compuestas de varios proveedores con resolución de nivel de zoom de 18. Las imágenes seleccionadas abarcan los meses de junio a octubre, que comprenden la época seca de la región con una nubosidad inferior al 5 %, y se georreferenciaron según cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN). El conjunto de imágenes (Tabla 1) que abarca

de 2016 a 2022 son parte del estudio de reserva hídrica de glaciares del Perú (AEGL-ANA, 2021) y estudios de glaciares desarrollados en SCGL-ANA (2023). Las fotografías aéreas registradas en los años de 1955, 1962 y 1970 fueron incluidas en el inventario de glaciares publicado por Hidrandina (1989) y digitalizados los mapas físicos por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH-ANA, 2014). Sin embargo, varias cordilleras presentan registros parciales de glaciares, siendo reanalizadas con imagen Landsat 2/MS del año 1985, apoyada de imagen temporal de Landsat Explorer (<https://livingatlas2.arcgis.com/landsatexplorer/>). Ambas informaciones fueron proporcionadas por la oficina de Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas-ANA, y adecuada para el presente artículo. En la Tabla 1, se denomina al periodo inicial al glaciar 1962 que registra foto aérea de 1955 a 1970 y reanálisis de imagen 2/MS de 1975 a 1985 de dimensiones similares por encontrarse en relativo equilibrio con el clima en los años '50 y '60 hasta finales de la década de los '70 (Rabatel et al., 2006; Rivera et al., 2017). Mientras el periodo final al glaciar 2020 al registro con imágenes de satélite de 2016 a 2022 con cambios inapreciables a escala 1/75.000 (SCGL-ANA, 2023; Schaefli et al., 2005; Tacsí et al., 2022). La cantidad total de glaciar, en periodo inicial, se distribuye de 1955 (2 %), 1962 (83 %), 1970 (4 %) y 1985 (11 %) y en periodo final, en 2016 (22 %), 2017 (31 %), 2019 (25 %), 2020 (5 %), 2021 (9 %) y 2022 (8 %).

Tabla 1. Imágenes de satélites y fotografías aéreas utilizadas para la identificación de glaciares.
Table 1. Satellite images and aerial photographs used for glacier identification.

Cordillera	Zona de los Andes	Imagen de satélite		Foto aérea	Landsat 2/ MS
		Plataforma	Año	Año	Año
Blanca	Norte	Landsat 8	2019	1962	1985
Blanca	Norte	Sentinel-2A	2019	1962, 1970	1985
Huallanca	Norte	Sentinel-2A	2020	1962	-
Huayhuash	Norte	Sentinel-2A	2020	1962	1985
Raura	Norte, Centrales	Sentinel-2B	2021	1962	-
La Viuda	Centrales	Sentinel-2A	2022	1962	-
Central	Centrales	Sentinel-2B	2022	1962	-
Central	Centrales	Sentinel-2B	2022	1962	-
Huagoruncho	Norte, Centrales	Sentinel-2B	2021	1962	-
Chonta	Centrales	Sentinel-2A	2016	1962	-
Huaytapallana	Centrales	Sentinel-2A	2021	1962	1985
Ampato	Centrales	Sentinel-2A	2017	1962	-
Huanzo	Centrales	Spot 6	2016	1962	-
Chila	Centrales	Sentinel-2A	2017	1955	-
La Raya	Centrales, Sur	Spot 6	2016	1962	-
Vilcabamba	Centrales	Spot 6	2016	1962	1985
Vilcabamba	Centrales	Spot 7	2017	1962	1985
Urubamba	Centrales	Spot 6	2016	1962	1985
Urubamba	Centrales	Sentinel-2A	2017	1962	1985
Carabaya	Centrales, Sur	Spot 7	2017	1962	-
Carabaya	Sur	Spot 6	2017	1962	-
Apolobamba	Sur	Sentinel-2A	2017	1962	-
Vilcanota	Centrales	Sentinel-2A	2017	1962	-
Vilcanota	Centrales, Sur	Sentinel-2B	2017	1962	-
Volcánica	Sur	-	-	-	1985
Las 19 cordilleras	Las tres zonas	SAS Planet	2016 - 2022	-	-

2.3. Proceso de imagen digital

2.3.1. Identificación de glaciares

En base a las experiencias aplicadas con éxito en la cordillera Blanca, Ampato y otros (Silverio y Jaquet, 2005; Racoviteanu et al., 2008; Ramos, 2018), se identificaron los glaciares limpios mediante el método del Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI) que utiliza las bandas espectrales verde (GREEN) e infrarrojo de onda corta (SWIR) (Ecuación 1). Se considera que el umbral del NDSI de mayor o igual a 0,4 es óptimo para las imágenes Landsat y Sentinel (Racoviteanu, et al., 2008) y en las imágenes Spot 6 y Spot 7, que no disponen de la banda SWIR, los glaciares fueron identificados mediante la clasificación supervisada (Sidjak, 1999). Mientras tanto, las imágenes de alta resolución SAS Planet facilitaron la delimitación manual de glaciares cubiertos de escombros (detritos) y ayudaron en la discriminación de la nieve estacional (Guo et al., 2015; Bomshoms et al., 2018). Luego, la delimitación de la parte baja del glaciar (limpio y cubierto) fue validada con datos de GPS (AEGL-ANA, 2021).

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad \text{Eq. 1}$$

2.3.2. Dimensiones del glaciar, superficie y volumen

El macizo glaciar presenta diversas geoformas, relieve y tamaño, teniendo en cuenta que cada unidad individualizada se encuentra en una cuenca con un único drenaje de agua (Müller et al., 1977). Así, la unidad glaciar del año 1962, establecida por Hidrandina (1989), se ha reducido y fragmentado en el tiempo (Tacsí et al., 2022). Es la base de la unidad glaciar del año 2020, que corrigió los contornos ubicados en las divisorias de aguas alteradas por la fusión del glaciar mediante el relieve topográfico del modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 30 m.

La estimación de superficie glaciar, obtenida de manera automática en la plataforma ArcMap, registra en una unidad un tamaño mínimo desde 0,005 km² hasta un máximo de 15 km² que está dispuesto en tres zonas de los Andes (Norte, Centrales y Sur). Para monitorear cuantitativa y cualitativamente el comportamiento de los diferentes tamaños del glaciar, se evalúan en 5 clases de tamaño (Tabla 2 y Figura 2) siguiendo la metodología usada en el estudio de AEGL-ANA (2021).

Tabla 2. Clase de tamaños de glaciares y cantidad de píxeles.
Table 2. Glacier size class and number of pixels.

Nombre	Tamaño km ²	Número de glaciares	
		1962	2020
Muy pequeño	0,005 – 0,05	184	529
Pequeño	0,05 – 0,5	2.074	934
Mediano	0,5 – 1,0	649	215
Grande	1,0 – 5,0	543	254
Muy grande	5,0 – 15,0	54	25

La estimación de los volúmenes de los glaciares se realiza mediante el uso del modelo Glacier Bed Topography (GlabTop), desarrollado por Linsbauer et al. (2012) en la plataforma ArcMap. Este modelo relaciona parámetros físicos en ecuaciones empíricas y ha sido aplicado en glaciares alpinos (Linsbauer et al., 2009; 2012), en glaciares del Himalaya-Karakoram (Frey et al., 2014) y en glaciares andinos del Perú (Muñoz, 2017; AEGL-ANA, 2021; Tacsí et al., 2022). Los tres insumos de entrada en GlabTop son: a) el DEM, b) el contorno glaciar, c) las líneas de flujo de agua (Figura 3a). Con estos insumos, se obtiene una imagen raster de estimación de profundidad del glaciar para cada píxel (Figura 3b) y la media aritmética es la profundidad media dentro del contorno glaciar. En tanto, el volumen es de profundidad media por el área de la unidad glaciar. Los DEM utilizados para determinar el volumen glaciar de 1962 son generados de Carta Nacional de IGN 1980, y el volumen glaciar del glaciar 2020 es mediante DEM ALOS PALSAR.

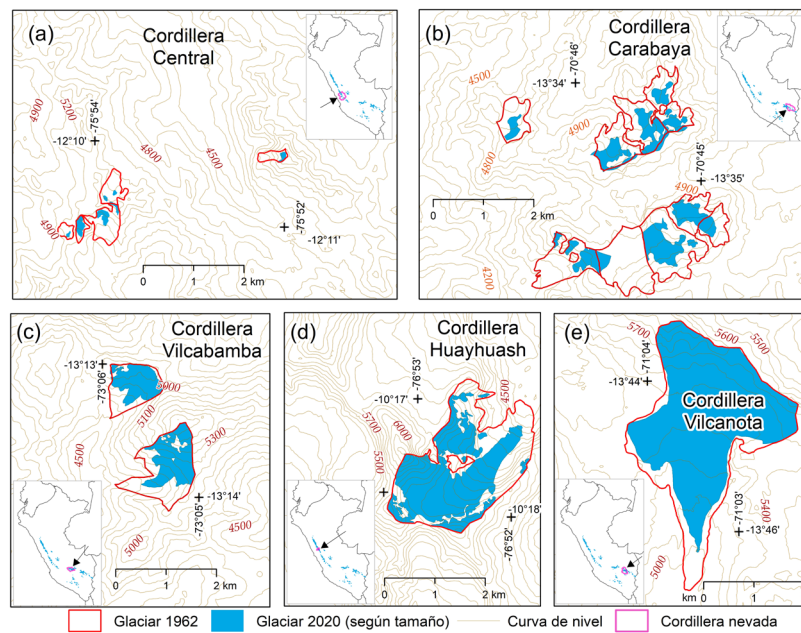


Figura 2. Ejemplo de glaciares 2020 según tamaño a escala 1/60,000. (a) Glaciar muy pequeño ($0,005 - 0,05 \text{ km}^2$). (b) Glaciar pequeño ($0,05 - 0,5 \text{ km}^2$). (c) Glaciar mediano ($0,5 - 1,0 \text{ km}^2$). (d) Glaciar grande ($1,0 - 5,0 \text{ km}^2$). (e) Glaciar muy grande ($\geq 5,0 \text{ km}^2$).
 Figure 2. Example of glaciers 2020 according to size at 1/60,000 scale. (a) Very small glacier ($0,005 - 0,05 \text{ km}^2$). (b) Small glacier ($0,05 - 0,5 \text{ km}^2$). (c) Medium glacier ($0,5 - 1,0 \text{ km}^2$). (d) Large glacier ($1,0 - 5,0 \text{ km}^2$). (e) Very large glacier ($\geq 5,0 \text{ km}^2$).

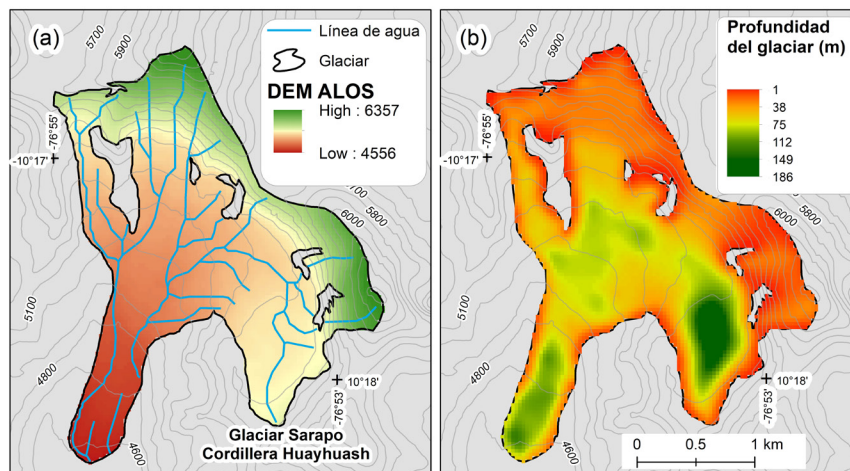


Figura 3. Cálculo de volumen del glaciar Sarapo del año 2020 con modelo GlabTop. (a) Datos de entrada. Línea de escurrimiento de agua (color celeste), contorno del glaciar (color negro) y DEM (trama de colores). (b) Profundidad del glaciar, representada mediante una trama de colores.
 Figure 3. Calculation of Sarapo glacier volume in 2020 with GlabTop model. (a) Input data. Water runoff line (light blue), glacier contour (black) and DEM (colored raster). (b) Depth of the glacier, represented by a colored raster.

2.4. Reserva hídrica del glaciar per cápita

Para determinar el potencial del recurso hídrico proveniente de los glaciares que será aprovechado por la población, se emplearon los datos de los censos poblacionales registrados por demarcación distrital (<https://datosabiertos.gob.pe/dataset/limites-departamentales>) ubicados en las cordilleras de los Andes para el año 1962 y el año 2020, utilizando la evolución de la población a través de los censos del Instituto Nacional de Estadística e Informática de INEI (2017).

2.4.1. Disponibilidad glaciar por distrito

Se identificaron todos los distritos que cuentan con la presencia de glaciares dentro de los límites de las cuencas hidrográficas. Dado esto, se asume que los habitantes utilizan el agua resultante de la fusión de los glaciares para diversas actividades, como consumo poblacional, agricultura, industria y otros usos. La Figura 4 muestra cómo la cobertura glaciar drena sus aguas a las cuencas, cubriendo total o parcialmente los límites distritales. En las Figura 4a y 4b, se observa que el 60 % y el 100 % del límite distrital, respectivamente, están influenciados por el glaciar dentro del límite de la cuenca y son zonas en que los habitantes dependen del agua glaciar para satisfacer sus necesidades hídricas. Para los fines de la investigación, se consideró que la totalidad de los habitantes aprovecha el agua proveniente del glaciar.

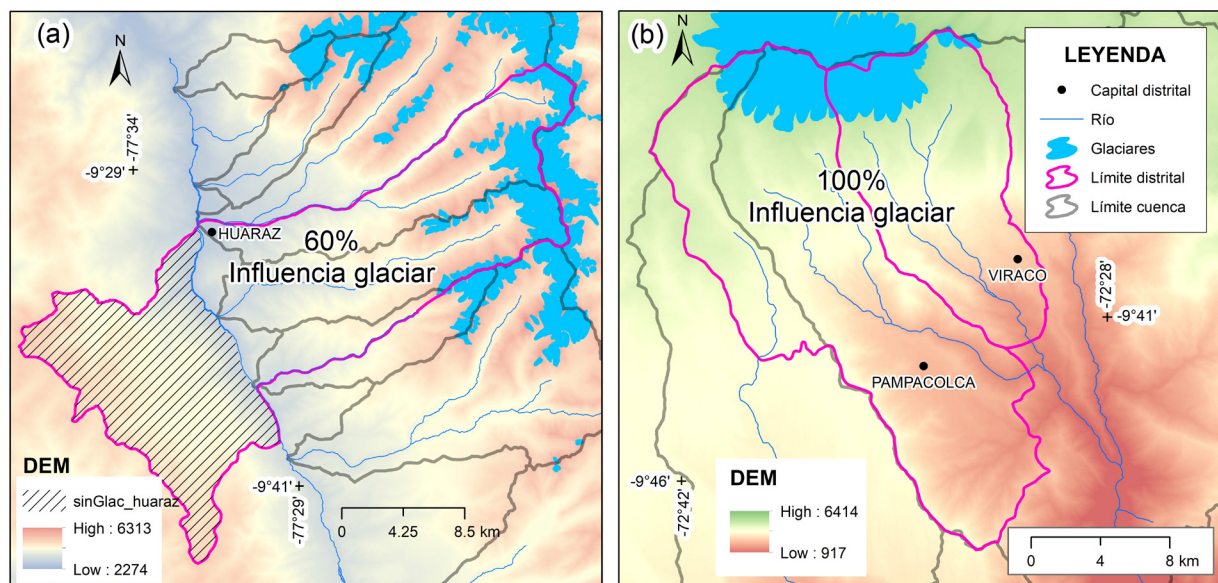


Figura 4. Aporte de fusión glaciar hacia centros poblados. (a) Distrito de Huaraz en Ancash, Andes Norte. (b) Distrito de Pampacolca y Viraco en Arequipa, Andes Centrales.

Figure 4. Contribution of glacial melt to population centers (a) District of Huaraz in Ancash, Northern Andes (b) District of Pampacolca and Viraco in Arequipa, Central Andes.

2.4.2. Población estimada para los años 1962 y 2020

Todos los distritos con presencia de glaciares según la demarcación territorial disponible en la web Datos Abiertos (<https://datosabiertos.gob.pe/dataset/limites-departamentales>). Se obtuvo el número de habitantes de cada distrito, reportados en los censos nacionales de INEI de los años 1981 y 2017, accesible en la web del Gobierno del Perú (<https://www.gob.pe/36495-consultar-informacion-de-los-censos-realizados-por-el-inei-censos-nacionales-de-poblacion-y-vivienda>). La Ecuación 2 fue aplicada para aproximar la población para el año 1962 y el año 2020. En esta ecuación, se utilizaron las tasas de crecimiento promedio anual publicadas por el INEI (2017), asignadas de la siguiente manera: $r = 2,8 \%$ entre los años 1962-1972, $r = 2,6 \%$ de 1972-1981 y $r = 1,5 \%$ de 2017-2020.

$$Pf = Po (1 + r)^t \dots \dots \dots (Eq. 2)$$

Donde: Pf (Población final), Po (población inicial), r (tasa de crecimiento poblacional), y t (tiempo)

3. Resultados

3.1. Distribución de glaciares según Andes

En los Andes del Perú, el año 1962 albergaba 3.504 glaciares, cubriendo una superficie de 2.349,20 km² y, un volumen de 69.564 hm³ y en el año 2020, el panorama había cambiado, reduciéndose a 1.957 glaciares, en una superficie de 1.049,00 km² y un volumen de 31.686 hm³ (Tabla 3). Esto representa una pérdida de superficie de 1300,20 km² (55 %) y de volumen de 37.878 hm³ (54 %). En la Figura 5, se visualiza la distribución espacial por Andes y valores de los parámetros de glaciares en los dos años. Al compararse, las mayores pérdidas porcentuales corresponden a Andes del Sur, cantidad (54 %), superficie (72 %) y volumen (67 %), y son seguidas por Andes Centrales y Andes del Norte. Con respecto a la profundidad media, los valores han incrementado ligeramente (Andes Peruanos, Andes Centrales y Andes del Sur).

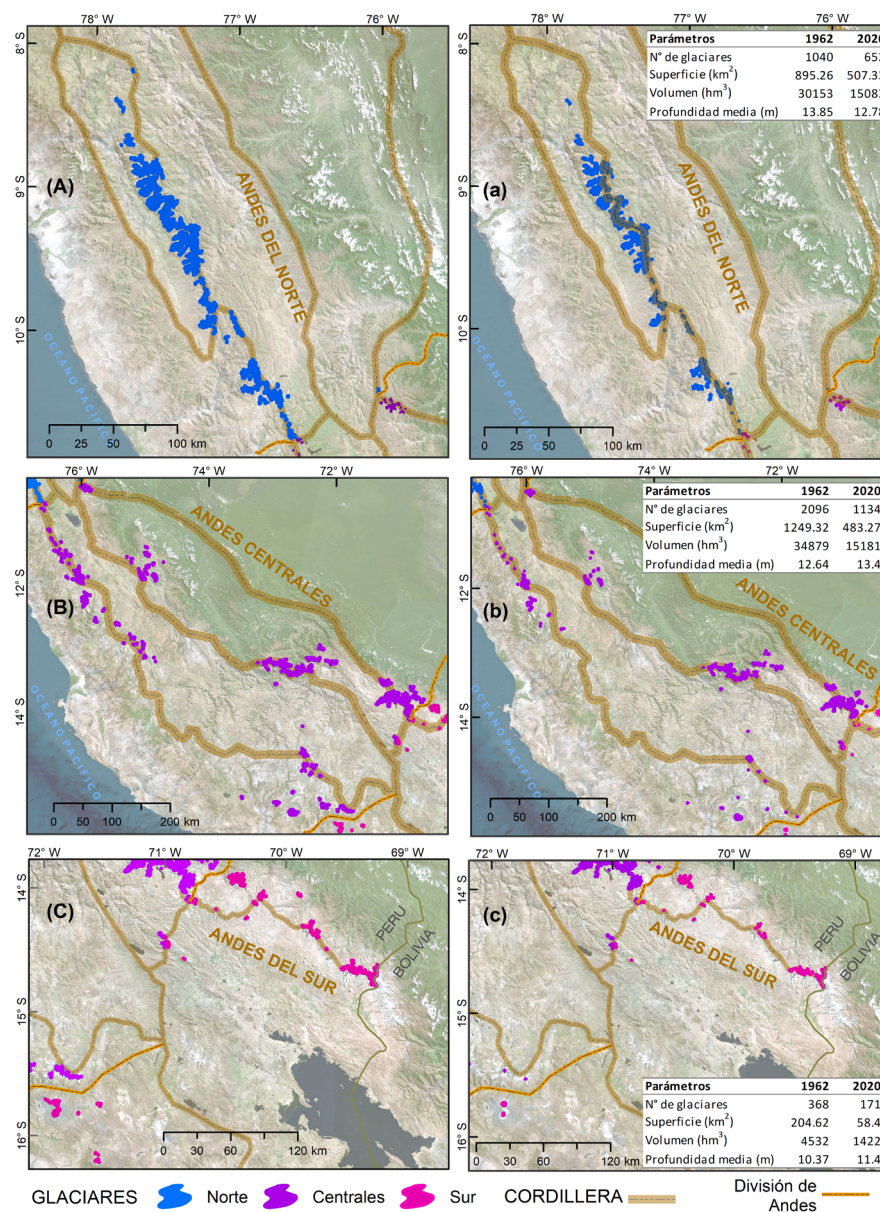


Figura 5. Distribución espacial y parámetros de glaciares en los Andes del Perú de: (A, B, C) glaciar 1962 y (a, b, c) glaciar 2020.

Figure 5. Spatial distribution and parameters of glaciers in the Peruvian Andes of: (A, B, C) glacier 1962 and (a, b, c) glacier 2020.

Tabla 3. Distribución de glaciares en las cordilleras de los Andes peruanos.

Table 3. Distribution of glaciers in the Peruvian Andes mountain ranges.

Parámetros	Unidad	1962	2020
Número de glaciares		3504	1957
Superficie	km ²	2.349,20	1.049,00
Volumen	hm ³	69.564	31.686
Profundidad media	m	12,7	13,1

Al comparar la distribución de glaciares en las cordilleras de los Andes peruanos (Tabla 4), se observa en los dos años que los parámetros (cantidad, superficie y volumen) presentan mayores valores en los Andes Centrales y los Andes del Norte. Pero, en los Andes Centrales, del glaciar 1962, de 2.096 unidades con 34.878 hm³ de volumen, en el glaciar 2020 ha disminuido a 1.134 unidades y 15.127 hm³ de volumen.

Tabla 4. Distribución de glaciares en las cordilleras de los Andes peruanos.

Table 4. Distribution of glaciers in the Peruvian Andes mountain ranges.

	1962				2020			
	Nº de glaciares	Superficie km ²	Volumen hm ³	Profundidad media m	Nº de glaciares	Superficie km ²	Volumen hm ³	Profundidad media m
NORTE	1.040	895,29	30.154	13,9	652	507,33	15.083	12,8
CENTRALES	2.096	1.249,31	34.878	12,6	1.134	480,17	15.127	13,5
SUR	368	204,60	4.532	10,4	171	61,50	1.476	11,5
TOTAL	3.504	2.349,20	69.564	12,7	1.957	1.049,00	31.686	13,1

3.2. Distribución de glaciares en 1962 y 2020 según tamaño

3.2.1. Parámetros morfométricos de glaciares en Perú

En la Figura 6, se aprecia el comportamiento de los parámetros de glaciares distribuidos en 5 clases de tamaño para los glaciares de 1962 y 2020. Al distribuirse los parámetros de glaciares, los mayores valores en ambos años predominan: número de glaciares (tamaño pequeño), superficie y volumen (tamaño grande) y profundidad media (tamaño muy grande). A la vez, en la figura están representados en barras los tamaños de glaciares. Al evaluar el comportamiento estadístico de los datos observados, se presentan en la medida de forma de distribución asimétrica y los valores de moda que separan en las dos tendencias: en cantidad, es sesgada a la derecha (moda se ubica en tamaño pequeño); en superficie y volumen, es sesgada a la izquierda (moda en tamaño grande); y en profundidad media, se distribuyen los valores de menor a mayor acorde al tamaño del glaciar. Respecto a las dos distribuciones de medida de forma del año 1962 y 2020, son casi similares, pero separadas por la disminución de la masa glaciar. En cuanto a los glaciares agrupados en las tres clases de tamaño menor a 1 km² (mediano), en ambos años presentan aproximadamente el 85 % de la cantidad total de glaciares, el 36 % de la superficie del total y el 17 % del volumen total. Las pérdidas volumétricas en 58 años aproximadamente, entre los tres tamaños (mediano a muy grande), son de 76 hm³ por año, 303 hm³ por año y 250 hm³ por año, respectivamente.

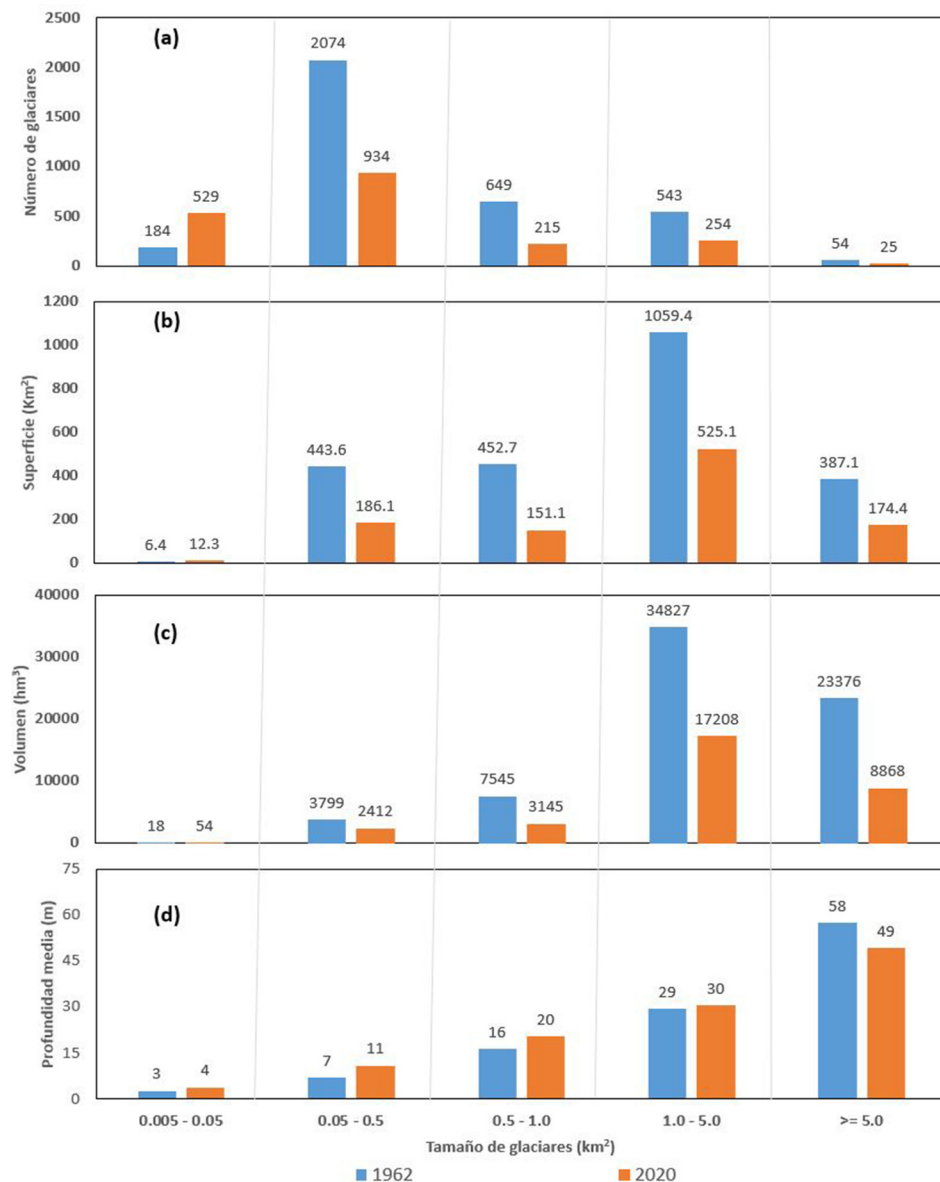


Figura 6. Distribución de los parámetros de los glaciares según su tamaño. (a) Número de glaciares. (b) Superficie. (c) Volumen. (d) Profundidad media.

Figure 6. Distribution of glacier parameters according to size. (a) Number of glaciers. (b) Surface area. (c) Volume. (d) Average depth.

3.2.2. Parámetros morfométricos de glaciares por cordilleras de los Andes

La Figura 7 muestra la comparación de parámetros de glaciares en los Andes en Perú según su tamaño. En las tres zonas de los Andes, en ambos años, las mayores masas glaciares se encuentran en los siguientes tamaños: en cantidad (pequeño), en superficie (grande), en volumen (grande) y en profundidad media (muy grande). Además, al evaluar la proporción de los parámetros en cada zona de los Andes entre los dos años, los mayores cambios porcentuales se observan en los Andes Centrales y sus valores en cada parámetro son: la cantidad de glaciares muy pequeños aumentó de 94 (5 % del glaciar 1962) a 330 (29 % del glaciar 2020), la superficie de glaciares medianos disminuyó de 286 km² (23 %) a 79 km² (16 %), y el volumen de glaciares muy grandes disminuyó de 10.566,0 hm³ (30 %) a 2.971,0 hm³ (19 %). Este cambio en las dimensiones se relaciona con la disminución de tamaño, donde algunos glaciares pasan de tamaño mayor a menor.

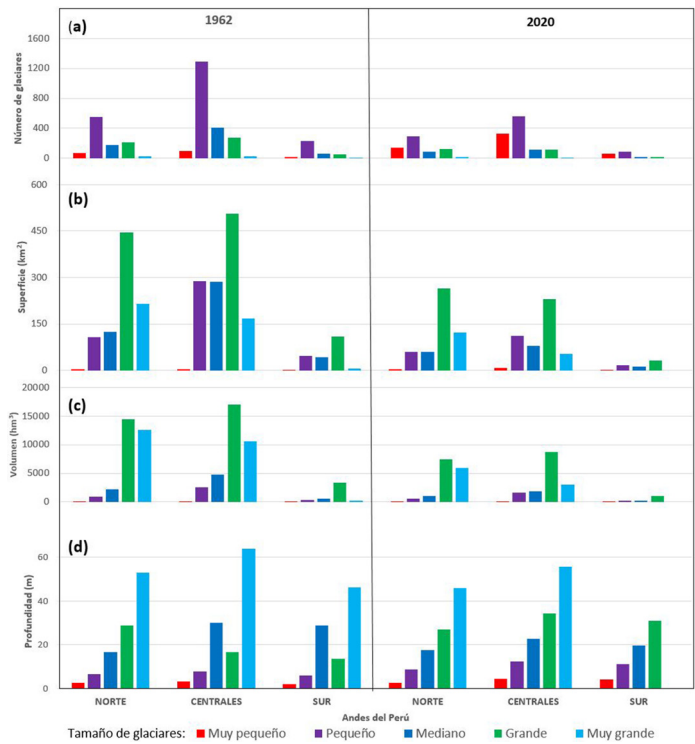


Figura 7. Comparación de los parámetros de glaciares por cordilleras de los Andes. (a) Número de glaciares. (b) Superficie. (c) Volumen. (d) Profundidad.

Figure 7. Comparison of glacier parameters by Andean mountain ranges. (a) Number of glaciers. (b) Surface area. (c) Volume. (d) Depth.

3.3. Distribución de demografía en la cordillera de los Andes

La Figura 8 muestra la distribución espacial de los distritos con cobertura glaciar y los valores de población asociados. En el año 1962, se registraron un total de 177 distritos con una población de 652.043 habitantes, mientras que en el año 2020 se observaron 152 distritos con una población de 1.275.307 habitantes. Es importante destacar que, en ambos años, los Andes Centrales con cobertura glaciar exhiben la mayor concentración de distritos y población en 1962 y 2020. En cuanto al crecimiento poblacional entre los 2 años, los Andes Norte, Centrales y Sur aumentaron en 107 %, 96 % y 61 %, respectivamente. Además, al año 2020, 25 distritos (14,1 % del total) han perdido su cobertura glaciar y 39.6770 habitantes no tendrán acceso directo a los glaciares.

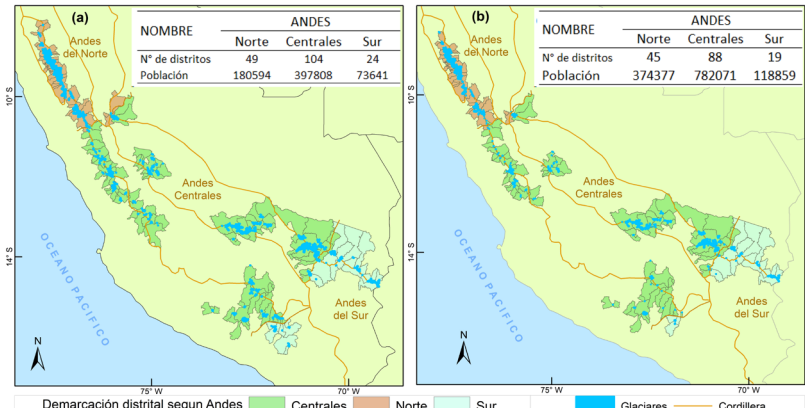


Figura 8. Distribución de distritos con presencia de glaciares en la cordillera de los Andes. (a) Año 1962. (b) Año 2020.

Figure 8. Distribution of districts with glaciers in the Andes Mountains. (a) Year 1962. (b) Year 2020.

3.4. Volumen y beneficio del hielo per cápita

Los volúmenes de glaciares estimados con el modelo GlabTop (Linsbauer et al., 2012) representan la reserva hídrica proveniente de las cordilleras nevadas en cada año, y en el intervalo de 58 años, se han reducido notoriamente. En la Figura 9a, se observan los cambios de disponibilidad volumétrica glaciar en los años de 1962 a 2020 en las tres cordilleras, reflejando que los mayores volúmenes se concentran en los Andes Centrales y del Norte de 35.922 hm³ y 301.545 hm³, respectivamente. Además, las mayores pérdidas porcentuales se presentan en los Andes del Sur (59 %) y Centrales (58 %). En la Figura 9b, se muestra el beneficio hielo per cápita (decímetros cúbicos por habitante) en los Andes de Perú. Esto representa la reserva de la masa glaciar (agua sólida) para cada habitante en dichos años, resultando en 1962 y 2020: Andes Norte (166,97 dam³/hab y 40,28 dam³/hab), Centrales (90,30 dam³/hab y 19,43 dam³/hab) y Sur (47,13 dam³/hab y 11,96 dam³/hab). Además, las aguas sólidas que se derritieron hasta el año 2020 fueron utilizadas por los habitantes en Andes Norte de 127 dam³/hab (76 %), Centrales de 71 dam³/hab (79 %) y Sur de 35 dam³/hab (75 %).

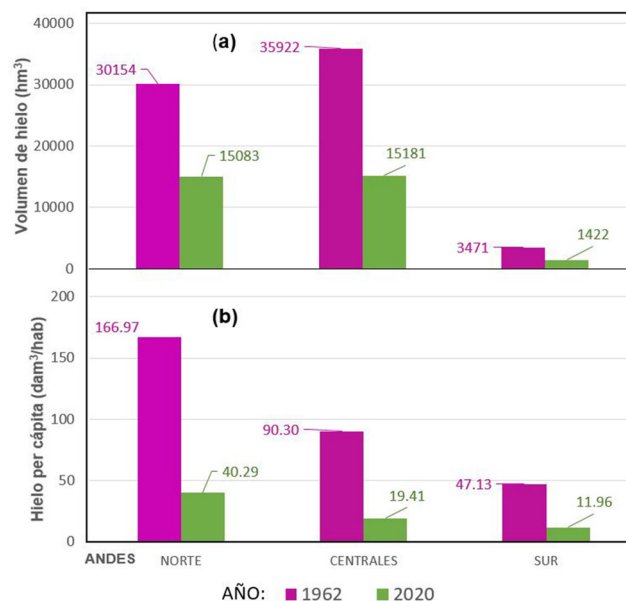


Figura 9. Disponibilidad glaciar en las cordilleras de los Andes en los años 1962 y 2020. (a) Volumen disponible del glaciar. (b) Volumen glaciar por habitante.

Figure 9. Glacier availability in the Andes mountain ranges in the years 1962 and 2020. (a) Available glacier volume. (b) Glacier volume per inhabitant.

4. Discusión

4.1. Variación temporal de parámetros de glaciares

Los parámetros de glaciares considerados como 1962 y 2020 corresponden a registros de varios años (Tabla 1), los que comparado a los valores reanalizados de dichos años representan variación temporal. En la Figura 10a y 10b, en color naranja se visualiza la distribución del parámetro de superficie de los años registrados (1955 a 1985 y 2016 a 2022) y en color azul los valores de superficie en 1962 y 2020 que fueron obtenidos en 100 glaciares en cada año, y los porcentajes de reducción ayudaron a estimar el valor total de 2.394,94 km² (1962) y 1.008 km² (2020). La diferencia entre lo registrado (color naranja) y el valor reanalizado estimado (color azul) es 45,74 km² (+1,94 %) en 1962 y 40,07 km² (-3,82 %) en 2020. Esta comparación de sobreestimación (1962) y subestimación (2020) expresada en porcentaje está en los valores de superficie y volumen de todas las tablas y figuras del presente estudio. Por esto, la variación temporal que influye ligeramente en los parámetros calculados de superficie y volumen la consideramos

como incertidumbre; y con fines de conocer en el glaciar su comportamiento de tamaño y aporte hídrico, se ha utilizado como una información referencial en la gestión de los recursos hídricos con cuenca glaciar.

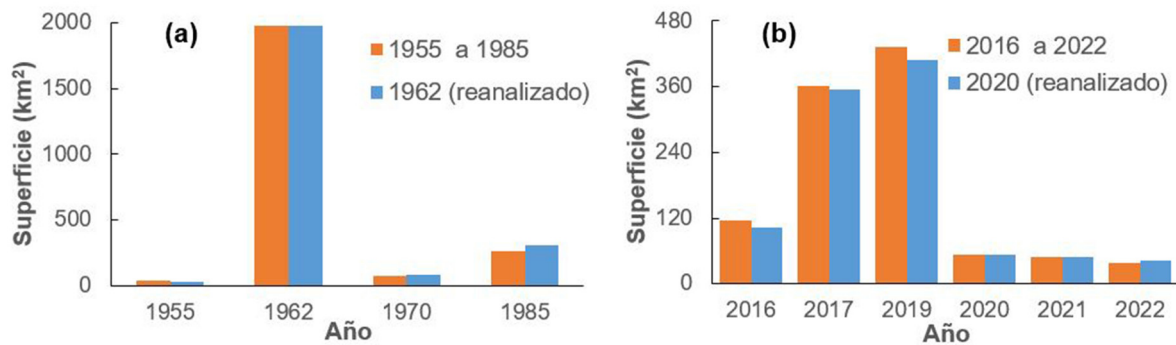


Figura 10. Variación superficial de: a) 1962 respecto a 1955, 1970 y 1985. b) 2020 respecto a 2016, 2017, 2019, 2021 y 2022.

Figure 10. Surface variation of: a) 1962 with respect to 1955, 1970 and 1985. b) 2020 with respect to 2016, 2017, 2019, 2021 and 2022.

4.2. Consideración en cambios de tamaños de glaciares

Siendo la pérdida de masa glaciar por tamaño, no es fácil de cuantificar debido a los cambios en la distribución de los glaciares a lo largo del tiempo. Por ejemplo, del año 1962 al 2020, los más afectados son 184 glaciares muy pequeños, de los cuales ha desaparecido casi el 100 % y en 2.074 glaciares pequeños ha ocurrido desaparición (60 %), pasó a glaciar muy pequeño (23 %) y algunos continúan en este tamaño (17 %). Este comportamiento puede que influya en el incremento ligero de profundidad media en algunas zonas de los Andes; aunque esta asunción queda en incertidumbre y requiere una investigación para justificarlo. Por esto, los cambios dinámicos en las 5 clases de tamaños evaluados tienen diferentes sensibilidades a los factores climáticos; donde en los Andes del Perú en los últimos 60 años, la temperatura ha aumentado en aproximadamente 1 °C por década y la precipitación ha disminuido en los trópicos exteriores (Seco y Húmedo) (Vuille et al., 2008; Tacsí et al., 2022); distribuyéndose en trópicos húmedos las 15 cordilleras (Figura 1) y en trópicos secos las 4 cordilleras (Huanzo, Chila, Volcánica y Ampato) con reducción superficial de 50 % y 77 %, respectivamente (AEGL-ANA, 2021).

En cuanto a los glaciares registrados de 0,005 km² a 15 km² que están agrupados en los 5 tipos de tamaño representan indirectamente al tiempo de su existencia; aunque no todos están afectados por la misma temperatura y precipitación por situarse a diferentes altitudes y latitudes. Pero deducimos que, después de 2020, los 529 glaciares (12,3 km²) de tamaño muy pequeño desaparecerán prontamente, seguido de 934 glaciares (186,2 km²) y así sucesivamente, y el tiempo de desaparición aproximado es estimado con hidro-glaciología utilizando climas futuros (Muñoz, 2017; Tacsí et al., 2021; Schauweckwer et al., 2017). Pero, a pesar de la pérdida de tamaño < 1 km² (86 % del número de glaciares) en un tiempo cercano, los 279 glaciares (≥ 1 km²) de reserva hídrica de 2.6076 hm³ (82 % del total) permanecerán un tiempo prolongado. En ubicación espacial, la zona del Sur está propensa a desaparición, donde solo 18 glaciares son mayores de 1.004 hm³ y no existe glaciar muy grande. Otro comportamiento en la distribución asimétrica del parámetro (superficie y volumen) entre los dos años (1962 y 2020) que tienen de valor de moda un tamaño grande, está en convertirse en tendencia ascendente por la desaparición de glaciares muy grandes, tal como ya sucedió en los Andes del Sur.

4.3. Comportamiento de glaciares en los Andes del Perú y Suramérica

Las dimensiones estimadas representan la situación actual entre los dos años (1962 y 2020), pero no necesariamente reflejan cambios específicos en cada glaciar. Por lo que se estima en el global el cambio de la masa glaciar, obteniéndose un 55 % de pérdida de superficie en 58 años. En tanto, otros Andes con glaciares tropicales reportan con registros de primer inventario de glaciares (Francou et al., 2013) e inventarios más recientes (Rivera et al., 2017), para Bolivia de 1975 a 2013 de 38 % de pérdida de

superficie; Ecuador de 1976 a 2010 de 34 %, Colombia de 1950 a 2011 de 62 % y Venezuela de 1950 a 2012 de 62 %. Lo que confirma la rápida contracción de glaciares en los Andes tropicales en América del Sur y son indicadores del cambio climático (Vuille et al., 2008), donde las consecuencias tienen múltiples impactos para los sistemas socioecológicos (Hock et al., 2019), incluyendo una reducción significativa en la disponibilidad de agua para el riego de los cultivos y una disminución de los rendimientos agrícolas en zonas montañosas (Bury et al., 2011).

4.4. Demografía considerada por INEI en el estudio

La estimación de la población en los años 1962 y 2020 se basó en tasas de crecimiento poblacional anuales obtenidas de los censos poblacionales de 1962 a 1981 (5,4 %) y de 2017 a 2020 (1,5 %). Sin embargo, estas estimaciones pueden no reflejar completamente la realidad debido a las variaciones en las tasas de crecimiento poblacional en diferentes zonas urbanas y rurales. Por ejemplo, mientras que Huancayo experimentó un crecimiento del 1,6 % (urbano), Yauli experimentó una disminución del 2,1 % (rural) (MPH-Huancayo, 2019).

4.5. Beneficio del volumen glaciar derretido

Los volúmenes de glaciares desaparecidos (derretidos) en 58 años han sido utilizados en diferentes usos. Pero las aguas de la fusión del glaciar (hielo y nieve) drenan hacia una quebrada y van desplazándose hacia abajo, incorporando las aguas (subterráneas y precipitaciones); pero, a diferentes distancias de la masa glaciar, son captadas en bocatomas por la población (Muñoz, 2017; García, 2011) y como ejemplo atribuimos a la distribución de los cuatro tipos de caudales producidos en la cuenca glaciar la proporción estimada en el estudio hidro-glaciológico de la microcuenca de Yanamarey y cuenca de Santa (Tacsi et al., 2024; Condom et al., 2012). Por lo que se puede asumir, los volúmenes de glaciares fusionados que escurren como caudal representan una porción del total de agua que ha producido la cuenca glaciar. Sin embargo, este aporte adicional de agua del glaciar al año 2020 queda en una reserva de 45 % de volumen (24.858 m³/habitante) y continúa reduciéndose; lo que amerita que las autoridades locales de agua implementen una adecuada gestión de cuencas en los distritos con presencia glaciar para el bienestar de la población creciente. Siendo en el Perú, del total de aguas registradas, superficial (98 %), subterránea (3 %) y marítima (2 %), la Autoridad Nacional del Agua en 2018 ha destinado en uso consuntivo (agrícola de 84 % de volumen, poblacional el 10 %, industrial el 4 % y minero el 2 %) (DNIRH-ANA, 2019).

5. Conclusiones

El estudio proporciona una visión detallada del estado situacional, determinando que, en los años 1962 y 2020, el 95 % de las masas glaciares se concentra en las cordilleras de los Andes Centrales y Andes del Norte y la mayoría de los parámetros de cantidad están en tamaño glaciar de 0,05 – 0,5 km², superficie y volúmenes en tamaño de 1,0 – 5,0 km². En tanto, la evolución de los glaciares en los Andes peruanos entre 58 años, aproximadamente, presenta una disminución significativa en el número de glaciares, así como en superficie y volumen, resultando que el beneficio hídrico del volumen del glaciar se reduzca de 106.660 m³/habitantes a 24.858 m³/habitantes. Estos resultados subrayan cambios significativos en la disponibilidad de glaciares para centros poblados, que están incrementando la población, y algunos distritos ya están quedando sin glaciares, lo que sugiere la necesidad de monitorear continuamente los glaciares, gestionar adecuadamente los recursos hídricos en estas áreas y comprender mejor el impacto del cambio climático en los glaciares.

Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a la oficina de Seguimiento al Comportamiento de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua (SCGL-ANA) por proporcionar la información de glaciares del año 1962 y 2020; y a CONIDA por proporcionar imagen Spot 6/7. Asimismo, agradecemos al IRD de Francia por la asesoría técnica para su publicación.

Disponibilidad de datos

Los datos de acceso libre (Imagen satelital, DEM, demarcación distrital, población por censo) se indican a la página web. Mientras, los shapefile de glaciares no se encuentran en ningún repositorio, pero pueden ser solicitados al autor con fines de investigación, sujeto a la aprobación de la oficina de SCGL-ANA.

Declaración conflicto de interés

Los autores del artículo no tienen conflicto de intereses.

Fuentes de financiación

No cuenta con ninguna fuente de financiamiento. Los autores utilizaron su tiempo como investigadores de cada institución.

Declaración de contribución de autoría

Arnaldo A. Tacsí: diseño de la investigación, recolección de datos, análisis de datos, metodología, revisión de literatura, redacción del artículo (borrador y final). Thomas Condom: revisión de literatura, contribución de interpretación, revisión crítica de la redacción borrador. Abel Mejía: revisión de análisis de datos y redacción borrador.

María Cardenas-Gaudry: revisión de análisis de datos y redacción borrador.

Referencias

- AEGL-ANA. (2021). *Reserva hídrica de glaciares del Perú*. Documento Técnico: Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-ANA. Huaraz-Ancash., 40p. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4802>
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., Portocarrero, C., Rathay, S., 2012. Glacier recession and water resources in Peru's cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58 (207): 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., Botero, V. 2020. Vulnerability of Rural Communities to Change in an Ecosystem Service Provision: Surface water supply. A Case Study in the Northern Andes, Colombia. *Land Use Policy*, 97: 104737. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104737>
- Bomshoms Calvelo, M., Quispe Gutiérrez, N., Quispe Vega, K., 2018. *Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú*. Informe técnico, Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, Subdirección de Predicción Meteorológica, SENAMHI-Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/198>
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A., Gómez López, R. J., 2011. Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1): 179–206. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1>
- Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R., McKenzie, J. M., 2013. Toward hydro-social modeling: Merging human variables and the social sciences with climate-glacier runoff models (Santa River, Peru). *Journal of Hydrology*, 518: 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.006>
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Tacsí, A., Suarez, W., Ramos, C., Apaestegui, J., Gomez, J., 2012. Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: A case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, 37(4): 442-459. <https://doi.org/10.1080/02508060.2012.706773>

- DNIRH-ANA, 2019. *Compendio Nacional de estadísticas de recursos hídricos*. San Isidro - Lima. In ANA-DNIRH. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4231>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., Oré, M. T., 2015. The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2 (6), 715-733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J. E., Silvestre, E. E., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J. L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O., Gomez, J., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., Lejeune Y., Ramallo, C., Mendoza, J., 2013. *Glaciares de los Andes Tropicales: víctimas del Cambio Climático*. Comunidad Andina, PRAA, IRD. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1255.4082>
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., Kulkarni, A., Linsbauer, A., Salzmann, N., Stoffel, M., 2014. Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8 (6): 2313–2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>
- García Hernández, J., 2011. Flood Management in a Complex River Basin with a Real- Time Decision Support System Based on Hydrological Forecasts. Communication 48 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques. https://crealp.ch/wp-content/uploads/2021/11/2011_Garcia_Hernandez_et_al_flood_management.pdf
- Guo, W., Liu, S., Xu, J., Wu, L., Shangguan, D., Yao, X., Wei, J., Bao, W., Yu, P., Liu, Q., Jiang, Z., 2015. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 61 (226): 357–372. <https://doi.org/10.3189/2015JoG14J209>
- Hastenrath, S., 1994. Recession of Tropical Glaciers. *Science*, 265: 1790-1791. <https://doi.org/10.1126/science.265.5180.1790>
- Hidrandina, S. A., 1989. Inventario de glaciares del Perú. In Concytec. San Borja-Perú, 278p.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H. I., 2019. High Mountain Areas. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. En *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 131–202 pp. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-2/>
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääb, A., 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592:726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- INEI, 2017. Características de la Población. En INEI (eds) *Perú: Perfil Socioeconómico Informe Nacional*. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima, Perú: INEI. 13-94 pp. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. New York, USA: Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Linsbauer, A., Paul, F., Haeberli, W. 2012. Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research*, 117: F03007. <https://doi.org/10.1029/2011JF002313>
- Linsbauer, A., Paul, F., Hoelzle, M., Frey, H., Haeberli, W., 2009. The Swiss Alps Without Glaciers – A GIS-based Modelling Approach for Reconstruction of Glacier Beds. En *Proceedings of Geomorphometry*, Zurich, Switzerland, 243–247pp. <https://doi.org/10.5167/uzh-27834>
- 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>
- Martín Murillo, L., Rivera Alejo, J., & Casto Robles, R. (2018). Cambio climático y desarrollo sostenible en Iberoamérica 2018. Informe La Rábida, Huelva, 218p. www.observatoriolarabida.com
- MPH-Huancayo, 2019. *Evaluación del plan de desarrollo provincial 2017 - 2024. Huancayo-Junín*. Informe Técnico: Municipalidad Provincial de Huancayo. http://documentos.munihuancayo.gob.pe/documentos/2019/transparencia/plan_evaluacion_PDPC_anual2018.pdf

- Müller, F., Caflisch, T., Müller, G., 1977. *Instructions for compilation and assemblage of data for a world glacier inventory*. Informe Técnico, World Glacier Inventory, International Commission on Snow and Ice. https://www.wgms.ch/downloads/Mueller_et_al_UNESCO_1977.pdf
- Muñoz, R. 2017. *Impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la subcuenca Quillcayhuanca, Perú*. Trabajo de fin de Master. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P., 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>
- Rabatel, A., Machaca, A., Francou, B., Jomelli, V., 2006. Glacier recession on Cerro Charquini (16°S), Bolivia, since the maximum of the Little Ice Age (17th century). *Journal of Glaciology*, 52(176): 110–118. <https://doi.org/10.3189/172756506781828917>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., Ordon, J., 2008. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54 (186): 499–510. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3333>
- Ramos, R., 2018. *Evolución De La Cobertura Glaciar Del Nevado Coropuna Y Su Relación Con El Entorno Climático*. Trabajo de fin de Master, Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/d0387af1-4969-4f1a-b246-61843af24a82>
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., Vuille, M., 2017. *Manual: Balance de masa glaciar*. Albany, USA: Centro de Estudios Científicos, CECs, University at Albany.
- SCGL-ANA. (2023). *Disponibilidad de recursos hídricos de glaciares de las cordilleras Chonta, Chila, Huanzo y Ampato*. Informe Técnico: Seguimiento Al Comportamiento de Glaciares y Lagunas-ANA. Huaraz-Ancash, 254. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/5683>.
- Schaeffli, B., Hingray, B., Niggli, M., Musy, A., 2005. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1): 73–117. <https://doi.org/10.5194/hessd-2-73-2005>
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmänn, 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>
- Schauweckwer, S., Kronenberg, M., Cruz, R., 2017. *El futuro del clima y de los glaciares en el Perú*. Proyecto Glaciares+. <https://proyectoglaciares.care.org.pe/wp-content/uploads/2018/05/Informe-Futuro-del-Clima-y-de-los-Glaciares-en-el-Peru.pdf>
- Schoolmeester, T., Johansen, K.S., Alfthan, B., B., Hespings, M. y Verbist, K. 2018. *Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. UNESCO y GRID-Arendal. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209>
- Sidjak, R. W., 1999. Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(2): 273–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/014311699213442>
- Silverio, W., Jaquet, J. 2005. Glacial cover mapping (1987 – 1996) of the Cordillera Blanca (Perú) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95 (3): 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>
- Tacsi, A., Condom, T., Cochachin, A., Montalvo, N., 2022. Seguimiento del comportamiento de tamaño morfométrico de glaciares y la relación de clima regional en la latitud 8 ° -16 ° S , Perú. *Aqua-LAC*, 14(1): 35–53.
- Tacsi, A., Condom, T., García, J., Cochachin, A., Mejia, A., 2021. Modelización hidro-glaciológico actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú. *Aqua-LAC*, 13(1): 108–127. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-08>
- Tacsi, A., Mejia, A., Condom, T., Cardenas-Gaudry, M., 2024. La contribución hídrica del glaciar y la dinámica de los procesos glaciológicos - hidrológicos de la cuenca . Caso Yanamarey , Cordillera Blanca , Perú. *Tecnología y Ciencia Del Agua*, 16 (6): 1–44. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-16-6-1>

- UGRH-ANA, 2014. *Inventario de Glaciares del Perú*. Informe Técnico: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-ANA. Huaraz-Ancash. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3646>
- Veettil, B. K., Pereira, S. F. R., Wang, S., Valente, P. T., Grondona, A. E. B., Rondón, A. C. B., Rekowsky, I. C., De Souza, S. F., Bianchini, N., Bremer, U. F., Simões, J. C., 2016. Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investigaciones Geográficas*, 51: 3–36. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41215>
- 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: 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>