



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Año 6, N°9

Abril 2025

ISSN 2519-7649



REVISTA DE GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

NÚMERO 9

REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Número 9 - Abril 2025

Presidenta Ejecutiva

Dra. Beatriz Fuentealba Durand

Directores y jefes:

Dra. Paola Moschella Miloslavich
Directora de Investigación en Glaciares (DIG)

Biol. Francisco Medina Castro
Director de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

M. Sc. Jessenia Cárdenas Campana
Directora de Información y Gestión del Conocimiento (DIGC)

Ing. Víctor Bustinza Urviola
Jefe de la Oficina Desconcentrada Macrorregión Sur - Cusco

Dra. Tatiana Boza Espinoza
Jefa de la Oficina Desconcentrada Macrorregión Centro - Lima

Editado por:

Mg. Steven A. Wegner

Comité consultivo:

Dr. Lonnie Thompson (School of Earth Sciences, The Ohio State University, Columbus, EE.UU.)

Dr. Cedomir Marangunic Damianovic (Geoestudios, Santiago, Chile)

Dr. Bernard Francou (LTHE - Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble, Francia)

Prof. Dr. Wilfried Haeberli (Geographisches Institut, Universität Zürich, Suiza)

Ing. Zaniel Novoa Goicochea (Departamento Académico de Humanidades - Sección Geografía, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima)

Dr. Jeffrey S. Kargel (Department of Hydrology & Atmospheric Sciences, The University of Arizona, Tucson, EE.UU.)

Dr. Enrique Flores Mariazza (Laboratorio de Utilización de Pastizales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima)

Dr. Hildegardo Aguilar (Centro de Investigación en Geografía Aplicada, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima)

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)
Sede central: Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz - Áncash - Perú
Teléfono: (043) 64 3460

Primera edición digital - Abril 2025

Diagramación y diseño portada:

Joan Ramírez Romero

Leslie Arestegui Saldaña

Foto de portada:

Dickens Rondán - Archivo INAIGEM

Depósito legal del libro N° 2025-07136

PRESENTACIÓN

El número 9 de la Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña incluye ocho artículos originales, en inglés y en español, que abordan una variedad de temas. Estos van desde el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa en un marco participativo, hasta la distribución y función hidrológica de los tipos de cobertura de suelo, e incluyen un artículo enfocado en el conocimiento ecológico tradicional. Todos vinculados a glaciares y ecosistemas de montaña, principalmente en la Cordillera Blanca del Perú.

La publicación de nueve números a lo largo de casi diez años de existencia del INAIGEM representa un logro significativo. Este resultado ha sido posible gracias a los esfuerzos conjuntos y sostenidos de diversos actores involucrados: los contribuyentes que respondieron a las convocatorias de artículos, el editor y el comité consultivo que garantizaron la calidad del contenido, y el equipo de diseño encargado de la etapa final de publicación.

Este esfuerzo ha permitido mostrar a la revista como un recurso valioso para la difusión de estudios de los glaciares y ecosistemas de montaña. Nada de esto habría sido posible sin el compromiso permanente del Mag. Steven Wegner, a quien quedamos infinitamente agradecidos.

Con la culminación de este número 9, se cierra un ciclo de la Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Aunque esta publicación ha sido un elemento importante dentro de los diez años de trabajo del INAIGEM, contribuyendo al conocimiento científico sobre nuestras montañas, creemos que es momento de reflexionar y evaluar nuevas estrategias para mejorar su acción en el futuro.

Este número final no solo marca el término de una etapa, sino que también representa un compromiso renovado con la difusión científica. Confiamos en que el legado de la revista continuará inspirando a investigadores y gestores comprometidos con el bienestar de nuestras montañas.

El INAIGEM

CONTENIDO

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA, EN UN MARCO PARTICIPATIVO EN LA LOCALIDAD DE RAMPAC GRANDE Y HORNUYOC, CARHUAZ, ANCASH	5
Roque Vargas, Jan Klimeš, Juan C. Torres, Harrinson Jara, Ana Marlene Rosario y Enver Melgarejo	
LAS QUEBRADAS QUILLCAYHUANCA Y SHALLAP Y LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA PARA HUARAZ: SUS GLACIARES, LA MINERALIZACIÓN Y LA CALIDAD DE LAS AGUAS	23
Benjamín Morales Arnao, Jorge Chira Fernández, César De la Cruz Poma y Luis Quispe Rentería	
LOS GLACIARES ESTÁN DESAPARECIENDO Y ANTE SUS CONSECUENCIAS, ¿QUÉ HACEMOS?	37
César A. Portocarrero Rodríguez	
IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CORDILLERA BLANCA (PERÚ): OBSERVACIONES POR SENSORES REMOTOS ENTRE 1987 Y 2020	43
Walter Silverio	
THE IMPORTANCE OF TRADITIONAL ECOLOGICAL KNOWLEDGE IN UNDERSTANDING ANDEAN SPONTANEOUS COMMUNITY RESPONSE TO INCIDENTS OF GLACIAR LAKES OVERFLOW: A CASE STUDY IN THE CORDILLERA BLANCA	69
Patricia J. Hammer	
DISTRIBUTION AND HYDROLOGICAL FUNCTION OF LAND COVER TYPES IN THE SHULLCAS WATERSHED, PERUVIAN ANDES	77
Morgan Sadler, Lauren D. Somers, Jeffrey M. McKenzie, Bryan G. Mark, Pablo Lagos and Michael Baraer	
COMMENTS ON LANDSLIDE OCCURRENCE UNDER CHANGING CLIMATE IN EARTHQUAKE-PRONE CORDILLERA BLANCA, PERU	95
Jan Klimeš and Adam Emmer	
PLATFORMING THE STORIES OF MOUNTAIN COMMUNITIES IN PERU: CLIMATE CHANGE VULNERABILITIES AND THE CASE FOR GLACIERHUB	107
Lily Roberts and Ben Orlove	

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA, EN UN MARCO PARTICIPATIVO EN LA LOCALIDAD DE RAMPAC GRANDE Y HORNUYOC, CARHUAZ, ANCASH

Susceptibility Analysis for Mass Movements, in a Participatory Framework in the Town of Rampac Grande and Hornuyoc, Carhuaz, Ancash

Roque Vargas¹, Jan Klimes², Juan C. Torres¹, Harrinson Jara¹, Ana Marlene Rosario¹ y Enver Melgarejo¹

¹Instituto Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña - INAIGEM, Huaraz, Perú

²Institute of Rock Structure and Mechanics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

Resumen

El Sector Rampac Grande de la Comunidad Campesina de Ecash se localiza en laderas montañosas de la Cordillera Negra, cuyo drenaje superficial llega directamente al río Santa en la provincia de Carhuaz, Ancash. Geológicamente, el basamento rocoso corresponde a las formaciones Carhuaz (Ki-ca) y Pariahuanca-Chulec-Pariatambo (kis-pchp), superpuestas por sedimentos inconsolidados del cuaternario que corresponden en su mayoría, a depósitos de deslizamientos (Q-ds) y depósitos aluviales (Q-alv). Así mismo, existe un depósito de disolución de carbonatos (Q-dc), que se observa como una superficie de costras sobre el material preexistente, típico de áreas donde existen estratos calcáreos. Comúnmente estos sedimentos, marcan los límites de zonas inestables por movimientos en masa, donde interactúan condiciones geológicas, geomorfológicas y geodinámicas, para determinar diferentes niveles de peligro por deslizamiento y reptación de suelos, los cuales han sido representados en un mapa de susceptibilidad de Rampac Grande y Hornuyoc. El análisis de susceptibilidad se realizó de forma participativa que integro investigadores, autoridades del nivel provincial y comunal, así como la población. El proceso se desarrolló en cuatro fases: acercamiento, diagnóstico, implementación y difusión. Los mapas fueron un soporte para la instalación del sistema de señalización de sectores críticos, rutas de evacuación y puntos de reunión en caso de ocurrir eventos extraordinarios, incluyendo el tipo de uso de suelo que debe considerar la población durante sus actividades. Esta información fue puesta a disposición de las autoridades competentes y la población para una adecuada gestión del riesgo de desastres.

Palabras clave: Geología, geomorfología, geodinámica, peligro, riesgo, deslizamiento, acción participativa

Abstract

The Rampac Grande sector of the rural community of Ecash is located on the mountain slopes of the Cordillera Negra, whose surface drainage goes directly to the Santa River in the province of Carhuaz, Ancash. Geologically, the bedrock corresponds to the Carhuaz (Ki-ca) and Pariahuanca-Chulec-Pariatambo (kis-pchp) formations, superimposed by unconsolidated Quaternary sediments that correspond, in their majority, to landslide (Q-ds) and alluvial (Q-al) deposits. There is also a deposit of dissolved carbonates (Q-dc), which forms a crust on the surface, which is typical for areas with presence of calcareous sediments. Usually, these deposits mark the boundaries of areas made unstable by mass movements, where geological, geomorphological and geodynamic conditions interact to determine different levels of danger due to landslide movement, which have been represented on a susceptibility map of Rampac Grande and Hornuyoc. The susceptibility analysis was carried out in a participatory manner that included researchers, provincial and communal level authorities, as well as the local population. The process was developed in four phases: approach, diagnosis, implementation and dissemination. The maps supported the implementation of the signaling system for dangerous areas, evacuation routes and meeting points in case of extraordinary events, including the type of land use that the population must consider during their activities. This information was made available to the competent authorities and the population for proper management in disaster risk management.

Keywords: Geology, geomorphology, geodynamics, hazard, risk, landslide, participative action

Introducción

Peligro o amenaza es la probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural o antrópico, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo o frecuencia definidos. Los procesos evaluados en este estudio son los movimientos en masa que ocurren por el efecto de la gravedad y condiciones geológicas, climáticas, erosión de los ríos y eventos sísmicos. Los diferentes procesos geodinámicos que ocurren en las laderas de la Cordillera Negra en Ancash incluyen deslizamientos, flujos, caída de bloques y avalanchas de rocas. Estos procesos afectan a las poblaciones de diferentes maneras. Algunos son procesos rápidos que ocurren en forma localizada, como las cárcavas, y otros con mayor dinámica de flujos, como las avalanchas de rocas que se mueven a gran velocidad y pueden afectar zonas extensas (Evans et al., 2009). En ambos casos son eventos muy peligrosos para la vida por su magnitud.

Los deslizamientos de tierra o roca, en la mayoría de los casos, no son eventos tan rápidos, pero pueden arrastrar grandes volúmenes de material, con deformaciones verticales y horizontales de varios metros que pueden afectar a la población y causar daños en importantes estructuras técnicas como casas, carreteras, puentes y otras. En casos esporádicos, los deslizamientos pueden transformarse en flujos muy rápidos (Klimeš y Vilímek, 2011).

Para elaborar el mapa de peligros por movimientos en masa, primero se ha preparado el mapa de inventario de los diferentes tipos de remoción en masa, describiendo

en forma detallada la mayoría de casos de movimientos en masa en toda la zona investigada. La preparación del inventario de peligros se sustenta en el análisis e integración de diferentes tipos de información: i) información obtenida del análisis de teledetección (imágenes de alta resolución), ii) resultados del mapeo geológico, geomorfológico y geodinámico en el campo y iii) información histórica y experiencias de la población local. La información recopilada y analizada garantiza que todos los lugares donde ha ocurrido un evento (frecuencia y distribución) sean incluidos en el mapa final, mostrando información gráfica más próxima a la realidad del terreno.

Para mitigar o minimizar la exposición a peligros por movimientos en masa, es muy importante considerar también las condiciones sociales, que deben incluir la evolución histórica de la comunidad, patrones de ocupación del territorio, su organización política, económica y administrativa y sus relaciones de convivencia con las entidades externas y con las propias comunidades, información que requiere una investigación local detallada. En forma general, se puede mencionar algunos antecedentes que sirvieron para facilitar la comunicación entre los expertos que desarrollaron el estudio y los miembros de la comunidad. La Constitución Peruana contempla el derecho ciudadano para conformar comunidades campesinas desde el año 1920, mediante el cual se protege los derechos que tienen los pueblos indígenas, lo que, a la vez, permite lograr los objetivos del estado también. Algo parecido se ve en las normas legales de la colonia que dieron un tipo de autonomía y protección a las comunidades indígenas, pero solo con fines económicos que beneficia-

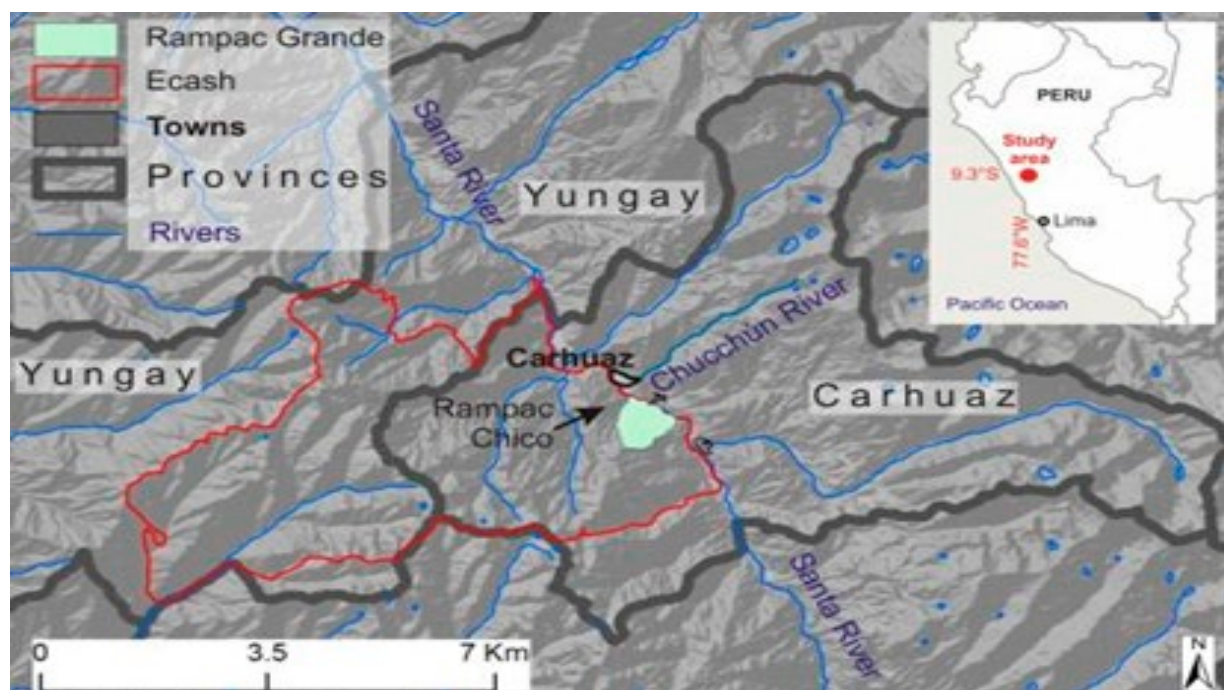


Figura 1. Ubicación del sector Rampac Grande - Hornuyoc (límites identificados con ayuda de la población local) dentro de la comunidad de Ecash. Los límites de la comunidad fueron definidos por COFOPRI (Comisión de Formalización de la Propiedad Informal, Perú) y la provincia de Carhuaz.

ban a los colonizadores. A pesar de esto, las comunidades tienen una gran historia y tradición de autogobierno y sentido común, manifestándose muchas veces con desacuerdos y acciones violentas, que se manifiestan como enfrentamientos entre las comunidades campesinas y las entidades externas (por ejemplo, administración colonial, estado peruano o empresas privadas), conflictos que en los últimos años están directamente relacionados con el uso y manejo de los recursos naturales (Carey et al., 2012; Tanaka et al., 2011).

La participación constituye una precondition para que los resultados de cualquier acto o proceso, en este caso una investigación, se traduzca en aportes aplicables. La participación tiene diferentes niveles y son de diferentes tipos dependiendo de sus propósitos. Para que el análisis de susceptibilidad sea una herramienta útil y favorezca el fortalecimiento de la población, se aplicó la Investigación con Acción Participativa (IAP) como base metodológica para poder acompañar a los distintos grupos de actores involucrados en el aliento de procesos de participación que permitan la construcción colectiva del conocimiento y el diseño participativo de estrategias complejas de intervención integral (Donadei, 2019). De esta manera los actores beneficiarios se conviertan en líderes de cambio.

El análisis de la susceptibilidad se realizó como parte del proyecto “Investigación sobre deslizamientos para la reducción de riesgos y la adaptación al cambio climático en ambientes de alta montaña en el Perú”, ejecutado en las localidades de Rampac Grande y Hornuyoc del distrito y provincia de Carhuaz, región Áncash, en el marco del convenio de “Cooperación Técnica Internacional, Respecto a la Implementación de un Proyecto Local a Pequeña Escala”, suscrito entre el INAI GEM y la República Checa a través de su embajada en el Perú, en el marco de la asistencia oficial para el desarrollo y ejecutado entre el 2016 y 2017.

Área del Estudio

La zona de estudio se encuentra sobre la margen izquierda del río Santa en la subcuenca de Atún Uran. Su relieve es accidentado con pendientes que varían entre 25%

y >75%, sobre todo en el sector medio de la subcuenca. El sector Rampac Grande es parte del distrito y provincia de Carhuaz, departamento de Ancash, forma parte de uno de los 34 sectores de la comunidad campesina de Ecash y ocupa una importante superficie en la Cordillera Negra (9 km²) (Figura 1). La cartografía temática local fue detallada a escala 1:10,000 y 1:25,000, cuyo enfoque podría replicarse en otras regiones andinos con procesos geodinámicos similares y donde la información temática es escasa.

El sector de Rampac Grande - Hornuyoc ocupa una amplia zona de deslizamientos antiguos, donde han ocurrido varios eventos geodinámicos, identificados como deslizamientos y movimientos en masa, con consecuencias destructivas y pérdida de vidas humanas (Cuadro 1), que pueden reactivarse por efectos climáticos y sísmicos.

Este sector se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias de diferente composición, cubiertas por depósitos cuaternarios originados por intemperismo y meteorización sobre litología poco competente y topografía fuertemente accidentada. Regionalmente, predomina un basamento de rocas mesozoicas, cuyos afloramientos comprenden rocas metasedimentarias plegadas del Cretáceo medio y superior, constituidas por rocas silicoclásticas y calcáreas del Grupo Goyllarisquiza (INGEMMET, 1995; Klimeš y Vilímek, 2011), que contienen limolitas, areniscas, lutitas, calizas y conglomerados. Sobre estos materiales encontramos rocas volcánicas de edad cenozoica, del Grupo Calipuy (Weston, 2008). Estas rocas intruyen en algunos sectores como stocks del Neógeno y son genéticamente relacionados a las granodioritas del batolito de la Cordillera Blanca. Estructuralmente, se presentan fallas y zonas de plegamiento en forma disarmónica, es decir, no presentan una secuencia de deformación regional similar.

Marco Metodológico para la Reducción de Peligros por Deslizamientos

El objetivo principal es evaluar los niveles de peligro por movimientos en masa para planificar un desarrollo seguro y sostenible de las comunidades andinas y dis-

Cuadro 1. Antecedentes históricos de movimientos en masa (deslizamientos) en el sector Rampac Grande, provincia de Carhuaz, departamento de Ancash.

FECHA	DESCRIPCIÓN	INVESTIGADOR
06/03/1870	A consecuencia de las filtraciones de una laguna alimentada por riachuelos de la Cordillera Negra, el pueblo de Rampac Chico en la provincia de Carhuaz es sepultado, muriendo muchas personas.	INDECI (2005) INRENA
28/02/1966	Deslizamiento en Rampac Chico.	Zamora (1966)
07/12/1972	Deslizamiento afecta cuatro casas.	Zapata (1972)
12/12/1972	Deslizamiento destruye dos casas más.	Zapata (1972)
25/04/2009	Deslizamiento en Rampac Grande con nueve muertos.	Klimeš y Vilímek (2011)
23/04/2012	Informe técnico del deslizamiento en Rampac Grande.	L. Meza Román

minuir la exposición a peligros que originan pérdida de vidas humanas y daños a las estructuras. Para lograr este objetivo, se tiene que cumplir con los siguientes requerimientos:

- i) La información sobre el peligro de los deslizamientos tiene que ser confiable, actual, completa y a escala detallada.
- ii) La presentación de la información final sobre el peligro tiene que ser clara y entendible no solo para los profesionales (ingenieros, administración local, defensa civil) sino también para la población local.
- iii) La población local como beneficiaria final tiene que participar y aceptar todas las etapas del proyecto, incluyendo la implementación de las medidas de prevención, según las recomendaciones del proyecto. La participación y aceptación de la población significa que los expertos externos (fuera de la comunidad) deben adecuar la metodología según las necesidades y condiciones actuales de la comunidad.

No cumplir con estos requisitos podría significar que la evaluación de campo puede subestimar/sobreestimar el peligro o que los resultados tal vez buenos desde el punto

de vista científico no van ser respetados e implementados por los pobladores de la zona. Por esta razón, el objetivo principal -protección de las comunidades- no se llegaría a cumplir.

Otra condición importante para la sostenibilidad del proyecto es que los resultados obtenidos y sus aplicaciones deben tener continuidad durante un largo período (monitoreo), para lo cual deben existir compromisos de cooperación mutua de la población y los expertos (“exit strategy”), donde la comunidad debe asumir la mayoría de las responsabilidades y los expertos externos deben estar involucrados en el ámbito del proyecto (Vilímek et al., 2020).

Metodología para Elaborar el Mapa de Peligros por Movimientos en Masa

La caracterización física del territorio es la información básica para evaluar los peligros por movimientos en masa. Sin embargo, gran parte del territorio peruano carece de dicha información. Por eso, la metodología aplicada requiere como primer paso elaborar el mapa detallado de inventario de movimientos en masa, graficando la distribución de todos los eventos anteriores que sirven de referencia para evaluar lo que podría ocurrir en el futuro (“el pasado es la llave del futuro”). Esto significa que las intensidades y la distribución espacial de los eventos que

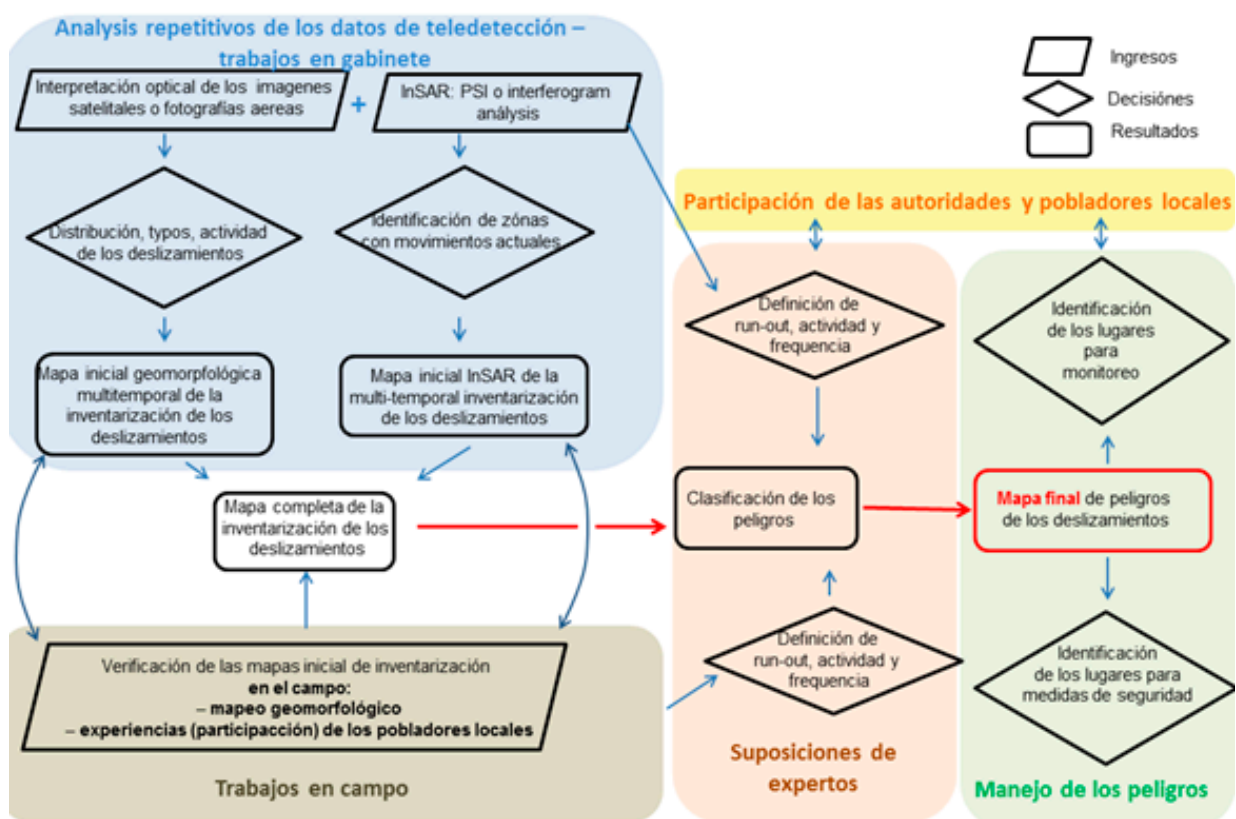


Figura 2. Esquema general de los pasos para analizar los peligros por remoción en masa aplicable en las zonas andinas. El mapa de inventario se sustenta en los trabajos en campo con participación de la población local, donde el equipo técnico-científico, los especialistas en temas sociales y diferentes autoridades de la comunidad afectada, deben participar durante todo el proceso para obtener un resultado confiable y aceptado por la población.

han ocurrido en el pasado son similares a los que pueden ocurrir en el futuro (Carrara et al., 1995). Este principio ha sido comprobado con numerosos trabajos que muestran que las zonas afectadas por movimientos en masa son altamente sensibles a la ocurrencia de nuevos eventos en el futuro, mayormente por la presencia de superficies de rotura antiguas, donde la resistencia de las rocas es menor comparada con las rocas en el entorno.

La falta de información detallada sobre la ocurrencia de eventos genera un alto grado de incertidumbre, siendo muy importante analizar y evaluar toda la información disponible para preparar los mapas de inventario. Para facilitar esta tarea, se debe integrar el análisis geológico, geomorfológico y geodinámico en el campo con la interpretación de los datos de teledetección para obtener

información multitemporal completa y a mayor detalle (Figura 2). Actualmente existen diferentes tipos de satélites que generan imágenes ópticas (Fiorucci et al., 2011, y la red satelital Planeta y PeruSat) o datos de Radar (SAR, Strozzi et al., 2013 y 2018). La información obtenida con esta tecnología puede mejorar las mediciones de la velocidad del movimiento, que representa una característica muy importante para preparar los mapas de peligros.

La investigación-acción participativa en el análisis de susceptibilidad se realizó en cuatro etapas. En cada una de ellas participaron diferentes actores y se usaron estrategias y técnicas diversas, lo que permitió obtener resultados y productos tanto para el análisis de susceptibilidad, así como para la gestión de riesgos de desastres (Cuadro 2; según Klimeš et al., 2019).

Cuadro 2. Etapas de la acción participativa.

Etapas del Proyecto	Métodos y Técnicas	Actores Involucrados	Resultados / Productos
Acercamiento entre autoridades, directivos comunales e investigadores para la formalización de la implementación de la investigación	<ul style="list-style-type: none"> Reuniones de coordinación (grupo focal) Asamblea comunal del Sector Rampac Grande 	<ul style="list-style-type: none"> Alcalde y regidores de la municipalidad de Carhuaz Directivos e investigadores del INAIGEM Embajador de la República Checa Comuneros 	<ul style="list-style-type: none"> Convenios internacionales con "licencia social" Planes de trabajo consensuados Comunicación de la utilidad y aplicación del mapa de susceptibilidad
Sensibilización y diagnóstico	<ul style="list-style-type: none"> Talleres Encuestas Entrevistas estructuradas 	<ul style="list-style-type: none"> Investigadores Representantes de la municipalidad de Carhuaz Líderes y dirigentes comunales Comuneros 	<ul style="list-style-type: none"> Calendario comunal de Rampac Grande Acciones pasadas de prevención y respuesta Línea de tiempo y percepciones locales frente al peligro de deslizamiento
Implementación	<ul style="list-style-type: none"> Mapeo de campo, selección de sitio e instalación de perfiles extenso Talleres para la presentación de avances del proyecto durante las visitas de campo Charlas o "asambleas" en la escuela local y el municipio de Carhuaz Instalación de señales de advertencia 	<ul style="list-style-type: none"> Investigadores Representantes de la municipalidad de Carhuaz Líderes y dirigentes comunales 	<ul style="list-style-type: none"> Cartografía detallada de la comunidad, especialmente con nombres toponímicos Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra Familiarización con los colores empleados en el mapa Identificación de elementos expuestos Perfil extenso métrico y mediciones
Difusión y comunicación	<ul style="list-style-type: none"> Charlas a todos los comuneros en asamblea del Sector Difusión del mapa mediante visitas a cada vivienda Visualización de mapas de peligro de deslizamientos en lugares seleccionados dentro de la comunidad Charlas en el municipio de Carhuaz 	<ul style="list-style-type: none"> Investigadores Líderes comunales Comuneros 	<ul style="list-style-type: none"> Paneles de difusión Mapa de susceptibilidad socializado Acciones futuras de prevención y preparación Mapa de peligros socializado y aceptado por la comunidad Acuerdo sobre las acciones futuras Cambio de percepción del peligro de deslizamientos de tierra

Análisis Temporal de Datos de Teledetección que Facilitan el Inventario de Peligros por Deslizamiento

Los datos de teledetección (imágenes de satélites con diferentes sensores o fotografías aéreas) ofrecen una gran oportunidad para entender la evolución histórica del origen y desarrollo de los deslizamientos en la zona de estudio. Los archivos digitales ofrecen información histórica desde 1990 y han ido mejorando con información de nuevos satélites que toman datos con alta resolución y frecuencia (por ejemplo, Sentinel 1 cada seis días, y GeoEye cada 2.6 días; Casagli et al., 2017) hasta las imágenes diarias con cobertura global (Planet).

Estos datos permiten mejorar la interpretación y análisis sobre los deslizamientos en diferentes momentos y a diferente escala. También permiten evaluar fácilmente áreas muy grandes, con sensores que recogen información en las ondas visibles y permiten elaborar importante información temática, como los mapas geológico, geomorfológico y fisiográfico, gracias a su gran resolución (Fiorucci et al., 2011; Strozzi et al., 2018). Otros tipos de sensores capturan información durante el día y la noche,

independiente de las condiciones meteorológicas (por ejemplo, SAR) y permiten analizar imágenes con tipos de información que no son visibles por el ojo humano. Esta información se encuentra disponible a nivel global, facilitando una buena interpretación del origen de los peligros por movimientos en masa (deslizamientos).

Caracterización Geológica del Área de Estudio con Trabajo de Campo e Interpretación de Imágenes de Satélite

Geológicamente, el sector de Rampac Grande se caracteriza por la presencia de estratos sedimentarios mesozoicos con areniscas, lutitas y calizas. Estos forman parte del basamento rocoso aflorante en el área de estudio, los mismos que están cubiertos principalmente por depósitos cuaternarios, donde existen zonas inestables que generan movimientos en masa como el deslizamiento de Rampac Grande. Asimismo, es importante indicar que existe un material compacto y duro distribuido sobre la superficie del terreno en forma de costra, producto de la disolución de material calcáreo, sobre depósitos cuaternarios pre-existent, algo característico en la zona de estudio por la presencia de sedimentos calcáreos (Figuras 3, 4 y 5).

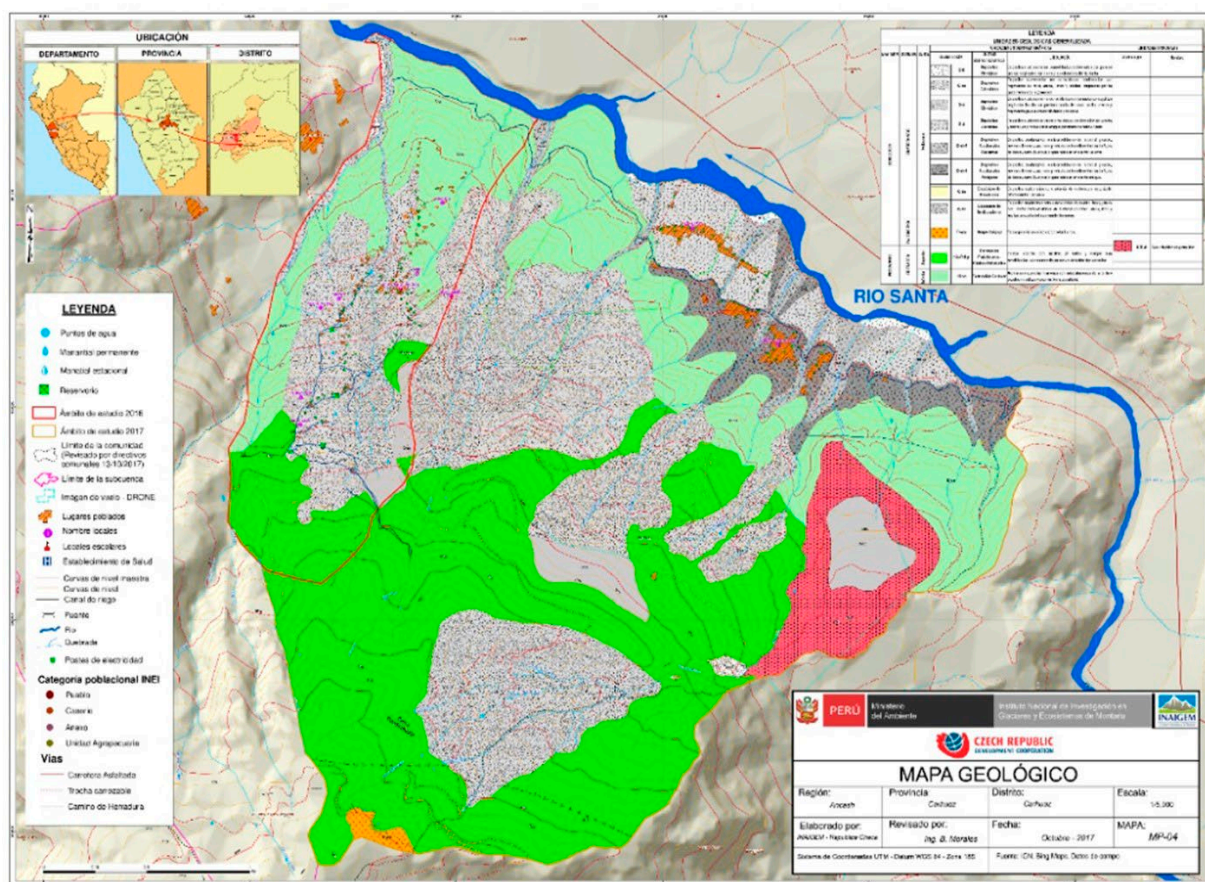


Figura 3. Mapa geológico de Rampac Grande y Hornuyoc, escala 1/25 000. Fuente: INAGIEM, 2017.

LEYENDA									
UNIDADES GEOLOGICAS GENERALIZADA									
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS			UNIDADES INTRUSIVAS			
			SIMBOLOGIA	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	LITOLOGIA	Simbologia	Nombre		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno		Q-fl	Depósitos Fluviales	Depósitos cuaternarios no consolidados conformados por gravas y arenas, originados por la actual geodinámica del río Santa			
				Q-co	Depósitos Coluviales	Depósitos cuaternarios no consolidados conformados por fragmentos de roca, arena, limos y arcillas; originados por la geodinámica de la gravedad			
				Q-el	Depósitos Eluviales	Depósitos cuaternarios no consolidados conformados por regolitos originados in situ con predominancia de limos, arcilla, arenas y fragmentos gruesos roca volcánica y calcárea.			
				Q-al	Depósitos Aluviales	Depósitos cuaternarios semiconsolidados conformados por gravas y arenas, originados por la antigua geodinámica del río Santa			
				Q-alv2	Depósitos Aluviales Recientes	Depósitos cuaternarios semiconsolidados de material gravoso, arenoso, limoso y arcilloso, producto de la sedimentación de flujos de lodos y barro (huaycos) y generados en un evento reciente.			
				Q-alv1	Depósitos Aluviales Antiguos	Depósitos cuaternarios semiconsolidados de material gravoso, arenoso, limoso y arcilloso, producto de la sedimentación de flujos de lodos y barro (huaycos) y generados en un evento antiguo.			
				Q-dc	Depósitos de Disolución	Depósitos cuaternarios de disolución de carbonatos proveniente afloramientos calcáreos			
				Q-ds	Depósitos de Deslizamiento	Depósitos cuaternarios semiconsolidados de material fino y grueso con clastos heterométricos de material calcáreo, arena, limo y arcillas producto del movimiento de masas			
	PALEOGENO				P-vca	Grupo Callpuy	Rocas piroclásticas (tobas) de color blanco.		
									KTI-di
MESOZOICO	CRETACEO	Superior		Kis-Pchp	Formación Pariahuanca-Chulec-Pariatambo	Calizas macizas con arcillitas y/o lutitas y margas bien estratificadas, con abundante presencia de fósiles tipo amonites			
		Inferior		Ki-ca	Formación Carhuaz	Areniscas y cuarcitas marrones con intercalaciones de arcillita y estratos de calizas y yeso en forma superficial.			

Figura 4. Leyenda de unidades geológicas regionales: Rampac Grande y Hornuyoc. Fuente: INAIGEM, 2017.

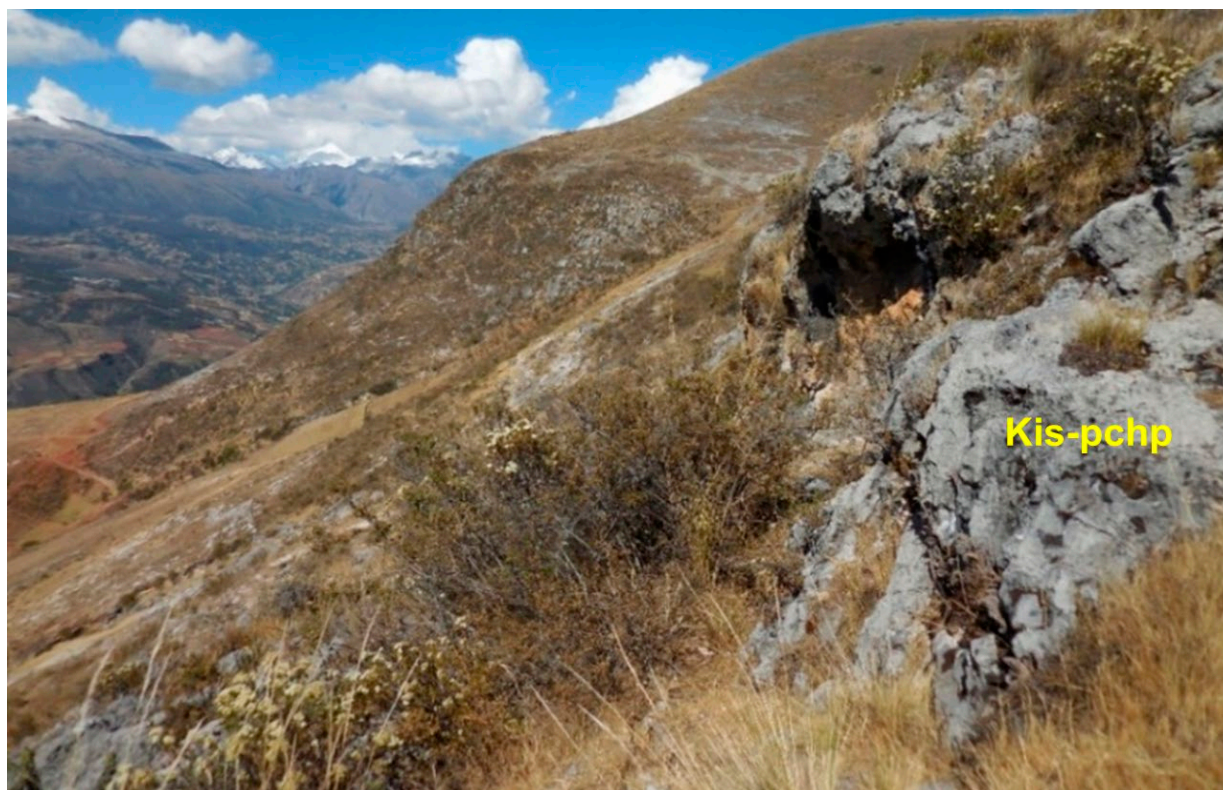


Figura 5. Secuencia sedimentaria calcárea de la formación Pariahuanca-Chulec-Pariatambo (Kis-pchp) en la parte media de la microcuenca. Fuente: INAIGEM, 2017.

Elaboración del Mapa Geomorfológico del Área de Estudio

Geomorfológicamente, la zona de estudio está caracterizada por la presencia de geoformas degradacionales, como laderas de montaña moderadamente empinadas (Lmme) y fuertemente empinadas (Lmfe), colinas altas moderadamente disectadas (Camd) y fuertemente disectadas (Cafd) y zonas activas de deslizamientos. También, se ha identificado geoformas agradacionales, como terrazas aluviales antiguas (Tal-1) y recientes (Tal-2) y terrazas fluviales (Tf), planicies inclinadas aluvionales (Pica), planicies inclinadas coluviales (Pic) y varios conos de deyección (Cd). Estas unidades geomorfológicas han sido representadas en el mapa geomorfológico que muestra las características físicas y geodinámicas del territorio (Figuras 6, 7, 8 y 9).

Para evaluar con mayor precisión las características morfológicas del área de estudio, se ha utilizado imágenes satelitales de alta resolución espacial (Schuster y Krizek, 1978; Dueholm y Pedersen, 1992). La información geodinámica sobre el terreno no es fácilmente observable, pero mediante el uso de sensores ópticos de satélites de alta resolución, cuyas imágenes están disponibles, como el Google Earth, por ejemplo, ha permitido disminuir la subjetividad del mapeo, facilitando la interpretación de

los expertos sobre la delimitación de los movimientos en masa. El Google Earth también permite rotación de imágenes y observaciones desde diferente ángulos y distancias que es muy útil para la identificación y descripción de las geoformas superficiales del terreno. En forma temporal, la toma de imágenes en diferentes fechas también ayuda a interpretar mejor la evolución histórica de los deslizamientos.

Durante la interpretación de las imágenes es importante detallar las siguientes características: tipo de remoción en masa (Smolíková y Loaiza, 2019), estado actual de su dinámica, fechas de ocurrencia, tipo de material desplazado, altura de los escarpes y el espesor de la acumulación. También, es preciso estimar la profundidad de la masa desplazada, pendiente, litología y condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del área afectada. Esta información ayuda a determinar con precisión la situación actual del deslizamiento. La confiabilidad y el nivel de detalle en la descripción de los movimientos en masa, depende de la experiencia del experto y su conocimiento de la zona de estudio.

La dinámica de los deslizamientos es un indicador importante para evaluar la peligrosidad, entendiendo que las formas que muestran movimientos recientes son las más peligrosas. Es muy difícil obtener información sobre mo-

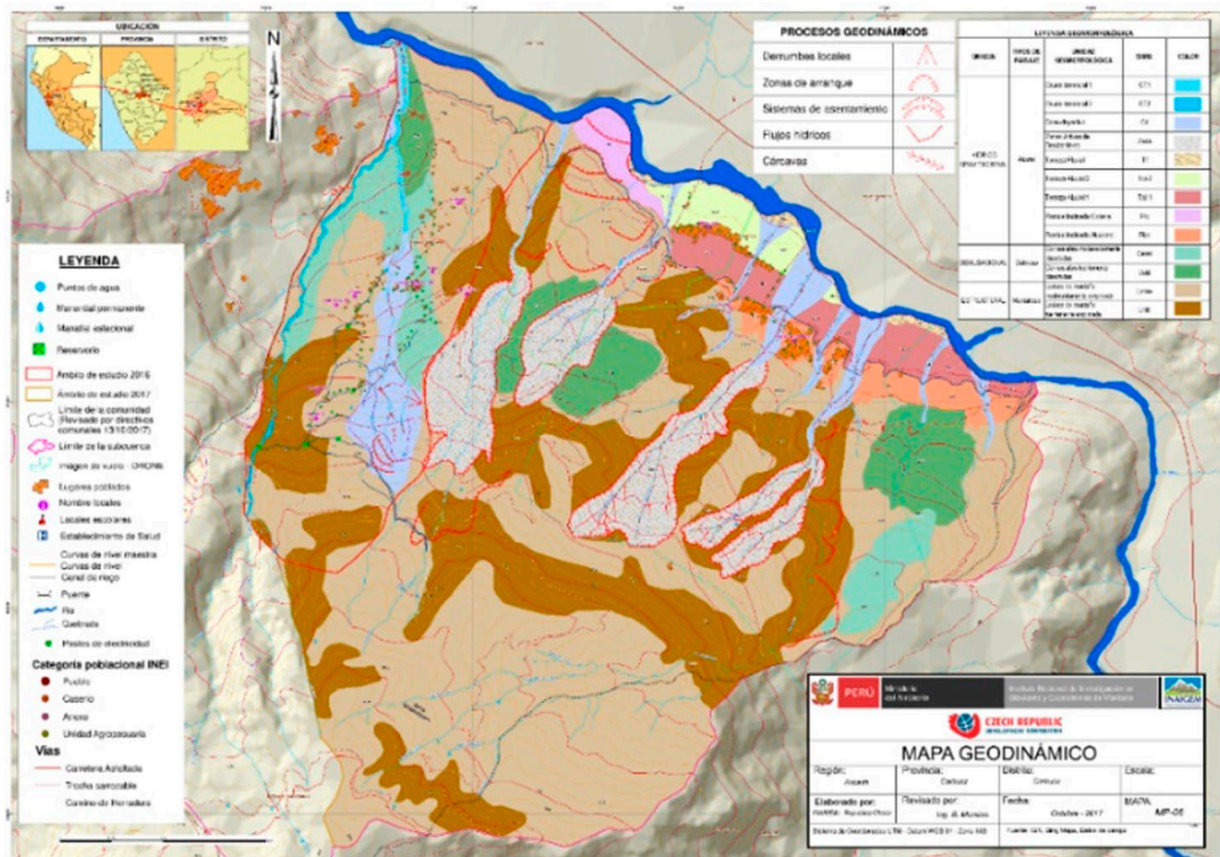


Figura 6. Unidades geomorfológicas y procesos geodinámicos en la zona de Rampac Grande y Hornuyoc, escala 1/25 000. Fuente: INAIGEM, 2017.


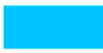







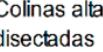
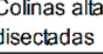
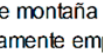
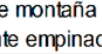
LEYENDA GEOMORFOLÓGICA				
ORIGEN	TIPOS DE PAISAJE	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	SIMB.	COLOR
HIDRICO GRAVITACIONAL	Aluvial	Cauce torrencial 1	CT1	
		Cauce torrencial 2	CT2	
		Cono deyectivo	Cd	
		Zonas Activas de Deslizamiento	Zads	
		Terraza Fluvial	Tfl	
		Terraza Aluvial 2	Tal-2	
		Terraza Aluvial 1	Tal-1	
		Planicie Inclinada Coluvial	Pic	
		Planicie Inclinada Aluvional	Pica	
DENUACIONAL	Colinoso	Colinas altas moderadamente disectadas	Camd	
		Colinas altas fuertemente disectadas	CaFd	
ESTRUCTURAL	Montañoso	Ladera de montaña moderadamente empinada	Lmme	
		Ladera de montaña fuertemente empinada	Lmfe	

Figura 7. Unidades geomorfológicas del área de Rampac Grande y Hornuyoc. Fuente: INAIGEM, 2017.



Figura 8. Zona de deslizamiento (Zads) en quebrada Yerbabuena. Fuente: INAIGEM, 2017.

vimientos en masa como resultado del monitoreo. En esta situación, es posible usar el método geomorfológico que evalúa el estado y las características actuales de las formas del terreno que pueden estar relacionadas con los movimientos actuales. Los deslizamientos son considerados activos cuando es posible observar una zona de arranque muy pronunciada, con suelos y rocas descubiertas (sin cobertura vegetal) y su acumulación claramente está em-

pujando las corrientes en favor de la pendiente, con evidencias de erosión superficial en las partes más escarpadas del deslizamiento. Estos movimientos en masa son considerados activos porque se supone que su desplazamiento es tan intenso que no permite que la erosión superficial y vegetación cubran y protejan las geoformas (McCalpin, 1984; Wieczorek, 1984).

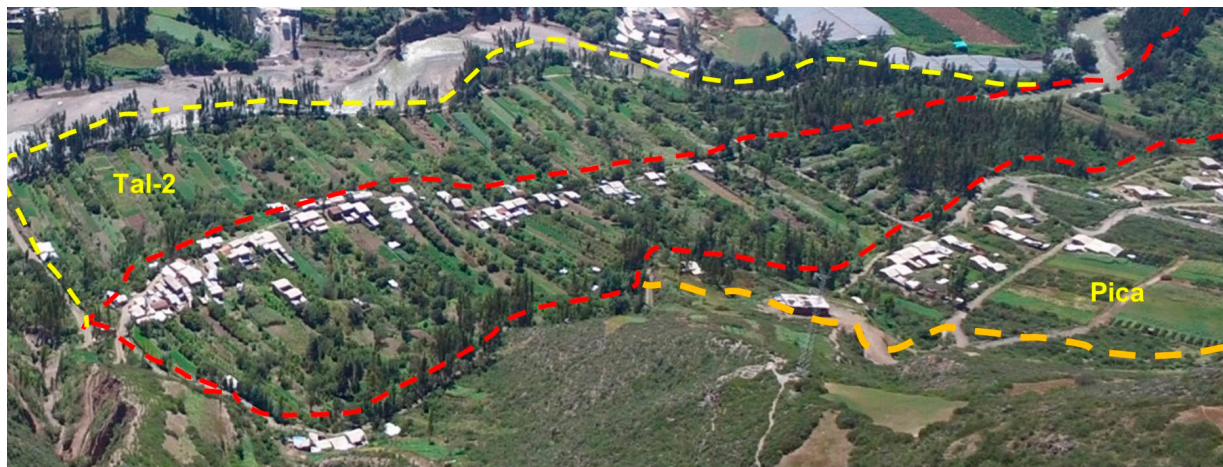


Figura 9. Terraza aluvial 2 (Tal-2), terraza aluvial 1 (Tal-1) y planicie inclinada aluvional (Pica), donde están asentadas la mayoría de viviendas y zonas de cultivo en Hornuyoc. Fuente: INAIGEM, 2017.

Geodinámica Externa

Rampac Grande y Hornuyoc se encuentran ubicados en una amplia zona inestable por geodinámica externa, con actividad reciente y posibilidades de reactivación por efectos hidrometeorológicos y sísmicos. Actualmente,

ocurren diferentes procesos geodinámicos originados por factores primarios, principalmente relacionados a la precipitación pluvial, pendiente del terreno, tipo de material aflorante; así como, por factores secundarios como la actividad antrópica y la sismicidad (Figuras 10, 11 y 12).



Figura 10. Vista panorámica de un deslizamiento antiguo. Obsérvese el tipo de material y la fuerte pendiente del terreno existente a lo largo de la línea discontinua. Fuente: INAIGEM, 2017.



Figura 11. a) Vista frontal de la zona de carcavamiento generando asentamientos en la quebrada Silvestreruri, b) grietas con anchos aproximados de 1.80 m. Fuente: INAIGEM, 2017.



Figura 12. Zona de arranque de un deslizamiento antiguo, vista hacia el este. Obsérvese los escarpes de falla a lo largo de la línea de arranque, graficado con una línea discontinua. Fuente: INAIGEM, 2017.

Identificación y Evaluación de Deslizamientos

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) usa la diferencia en fase de dos imágenes satelitales SAR para calcular el desplazamiento de la superficie del terreno. Las ventajas de este método son la amplia cobertura de superficie (grandes extensiones de terreno pueden ser evaluados al mismo tiempo), mayor sensibilidad al movimiento superficial (desde milímetros por año) y disponibilidad de imágenes en archivo desde 1991 (Strozzi et al., 2013), con el ciclo de tomas mensuales (por ejemplo, Envisat, ERS-1/2) hasta diarias (por ejemplo, Pleiades y RapidEye). Además, pueden ser tratadas con varios métodos para obtener mapas de deformación del terreno.

Para la interpretación en la zona de Rampac Grande, las imágenes fueron procesadas con la técnica PSI (Permanent Scatter Interferometry; Crosetto et al., 2016) y

DinSAR (Differential SAR Interferograms; Strozzi et al., 2013), dando como resultado los mapas de desplazamiento de la superficie. Estos mapas fueron interpretados por un experto para identificar zonas con alto grado de desplazamiento, lo que fue clasificado en cuatro clases usando código suizo (Raetzo y Loup, 2016): 0-2 cm/yr; 2-10 cm/yr; 10-50 cm/yr and >50 cm/yr (Figura 14). Las zonas con alto movimiento fueron comparadas con imágenes satelitales de alta resolución óptica (Google Earth y Bing) para identificar formas del terreno y clasificar estas zonas según las formas del relieve, como desplazamientos, asentamientos, morrenas y áreas afectadas por actividad agrícola (Strozzi et al., 2018). El uso de las imágenes satelitales ópticas ha permitido comparar sectores con gran movimiento con otros que no muestran movimiento pero que forman parte de la misma geoforma. El resultado de estos trabajos es el mapa inicial InSAR del inventario multi-temporal de los deslizamientos (Strozzi et al., 2018).

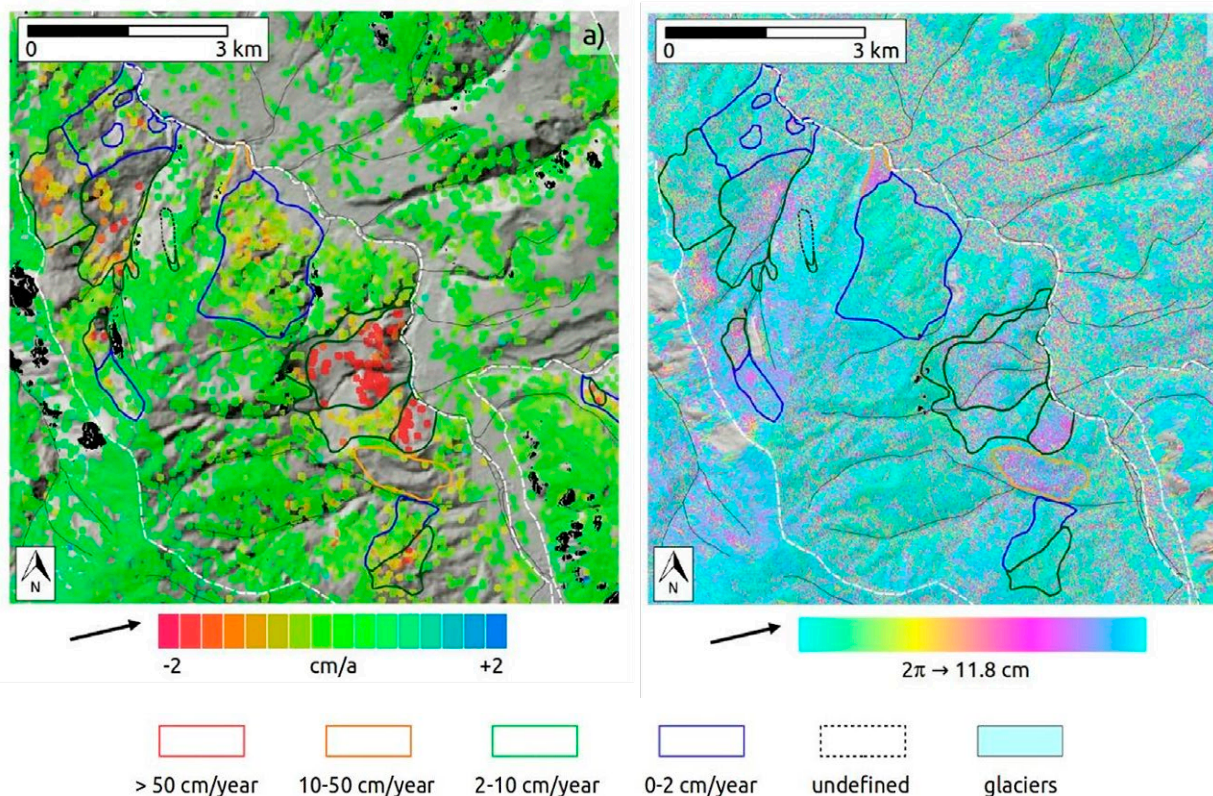


Figura 13.

La parte del inventario de deslizamientos de la zona de estudio preparada usando solo los resultados de los análisis de InSAR (preparada de Strozzi et al., 2018). Los deslizamientos están clasificados con respecto al movimiento de la superficie identificado por medio de dos técnicas de análisis: a) PSI usando el satélite ALOS-1 PALSAR-1 para el periodo 2007-2011, y b) DinSAR usando el satélite ALOS-2 PALSAR-2 para el periodo 2016.02.21-2016.10.02 (mapa reproducido con el permiso de los autores).

Investigación-Acción Participativa durante 2016 y 2017

El deslizamiento catastrófico de abril 2009 despertó el interés de instituciones de investigación del Perú y del extranjero. Los resultados obtenidos hasta el inicio del proyecto generaron actitudes de desconfianza y rechazo hacia la ayuda externa, por lo que las estrategias de inicio fueron claves para el inicio del Proyecto.

El primer paso fue buscar la “licencia social”, entendida como el permiso que otorga la población para el desarrollo del Proyecto. Para ello, se iniciaron reuniones de acercamiento entre todos los involucrados como investigadores, autoridades de la municipalidad provincial de Carhuaz, líderes del sector Rampac Grande y la Embajada de la República Checa. El principal propósito fue generar confianza y comunicar los objetivos del proyecto, los beneficios de la participación para disminuir la amenaza de deslizamiento, y el alcance del estudio del análisis de

susceptibilidad representado en mapas. El uso de los mapas y sus características causaron mayor interés, debido a su aplicación para inversiones del gobierno local sobre la gestión del riesgo de desastres. Se precisó que el mapa de susceptibilidad es un insumo para el mapa de peligros y éste, para el mapa de riesgos.

En la etapa de sensibilización y diagnóstico se realizaron talleres de capacitación donde participaron autoridades del centro poblado de Rampac y de la Municipalidad Provincial de Carhuaz, el director y docentes de la Institución Educativa N° 86273 de Rampac Grande, la responsable del Puesto de Salud y pobladores, especialmente de la tercera edad (es decir, mayores de 60 años). Se obtuvo información de la ocurrencia del deslizamiento a través de una línea tiempo, percepciones y/o comentarios sobre

las causas y consecuencias, el mapa comunal y las actividades que desarrolla la comunidad durante los doce meses del año. Esta actividad permitió recopilar información de las actividades, costumbres y creencias. Finalmente, se compartió conceptos asociados a la gestión del riesgo de desastres: peligro, vulnerabilidad y riesgo. La narración de ocurrencia de deslizamiento y el uso de palabras quechua para definir los tipos de deslizamiento motivó una escucha atenta, y la participación y fuerte impresión en los asistentes. Con los resultados, se procedió a realizar una encuesta de percepción del peligro. Un 50% de las familias considera que no ocurrirán nuevos deslizamientos (Figura 14).



Figura 14. Fortalecimiento de capacidades de los pobladores de Rampac Grande y Hornuyoc, durante los talleres ejecutados por INAIGEM. Fuente: INAIGEM, 2017.

Implementación de Medidas de Prevención-Señalización Física

En esta etapa se realizó el mapeo en campo que consistió en completar nombres toponímicos, la red hidrológica, la delimitación del área comunal, y otra información necesaria para ser incorporada en los mapas. Los resultados de trabajo de campo, así como el mapa preliminar de susceptibilidad, fueron presentados en un taller para autoridades y pobladores. Los colores empleados en el mapa causaron preocupación en los asistentes, pues manifestaron su rechazo al color rojo. Para los pobladores el rojo representa ser excluidos por ser una zona de riesgo. Este

aspecto fue ampliamente analizado con los participantes. Posterior a esta actividad con pobladores de la zona, se recogió información de los elementos expuestos en la zona de Rampac para poder proyectar las posibles afectaciones en caso de producirse un nuevo deslizamiento. De igual manera se determinó las zonas seguras y rutas de evacuación en caso de presentarse una emergencia. Esto sirvió para instalar dos perfiles extensométricos y una serie de señales (letreros) de seguridad e informativos, indicando el tipo de proceso geodinámico o evento (deslizamiento, huayco, derrumbe, etc.) y las rutas de evacuación, de tal manera que las personas puedan alejarse del peligro y buscar zonas con mayor seguridad (Figura 15).



Figura 15. a) Letrero de información donde se muestra el Mapa de Peligros, ubicado al ingreso de Hornuyoc, b) Letrero de señalización sobre zonas de peligro, ubicado en la zona de Rampac Grande, c) Letrero de señalización sobre el punto de reunión, ubicado en la zona de Hornuyoc. Fuente: INAIGEM, 2017.

Difusión y Comunicación de los Resultados del Análisis de Susceptibilidad

En una asamblea comunal (Figura 16), se presentó el mapa de susceptibilidad. Esta actividad se desarrolló en dos momentos importantes. En el primero se conformó cuatro grupos, uno por cada barrio. Para los barrios de Ircan, Urushca, Cochac y Huanca se entregaron el mapa para que ubiquen e identifiquen el nivel de exposición de sus viviendas ante el peligro por deslizamiento y la ubicación de zonas seguras y vías de evacuación ante la ocurrencia del peligro por deslizamiento. Asimismo, cada poblador se colocó en el pecho el color correspondiente al nivel de exposición de su vivienda (rojo para exposición al peligro muy alto, naranja para peligro alto y amarillo para peligro medio). Esta actividad permitió dar a conocer a cada poblador el grado de exposición de su vivienda y la ubicación ante el peligro de deslizamiento. En el segundo momento, se realizó en plenaria la estimación de daños de sus medios de vida. Se recogió información de las propuestas de las medidas de mitigación y respuesta frente al riesgo de desastres por el peligro deslizamiento en Rampac grande. Otra actividad fue hacer visitas de casa en casa para ver en qué zona de susceptibilidad se ubica cada vivienda. Finalmente, los resultados fueron presentados oficialmente a la municipalidad provincial de Carhuaz.

Validación de Resultados Preliminares con Participación de Pobladores Locales

Se analizaron los resultados preliminares del inventario InSAR y el mapeo geomorfológico de los deslizamientos que serán validados durante la fase de campo. Con esta información fue posible identificar y delimitar algunos

deslizamientos antiguos, visibles en las imágenes satelitales del Google Earth. También ha permitido modificar los límites de algunos deslizamientos y precisar el estado de la actividad, que ha servido para evaluar los niveles de peligrosidad con mayor precisión. La observación directa y mapeo de campo ha permitido entender mejor los procesos y condiciones de ocurrencia reciente de los deslizamientos. También ha servido para poder identificar y describir las diferentes geoformas que favorecen estos movimientos.

Todos los trabajos en campo se han realizado con participación de la comunidad para facilitar el intercambio de información. La experiencia y el conocimiento del territorio de los colaboradores fue muy importante y aportó mucha información sobre la frecuencia e intensidad de los deslizamientos. Esta metodología mostró la importancia de combinar varias fuentes de información sobre la distribución espacial y dinámica de los movimientos en masa, algo muy importante para definir los niveles de peligrosidad.

Preparación del Mapa de Susceptibilidad ante Peligro por Movimientos en Masa

La caracterización geomorfológica y el análisis de la información sobre varios movimientos en masa identificados, utilizando la técnica InSAR, ha permitido preparar un mapa de peligros con mucha precisión. Estos niveles reflejan también la estimación del tamaño, velocidad y probabilidad de ocurrencia de las remociones en masa, en base a la historia y frecuencia de ocurrencia en la zona de Rampac Grande, calculada usando la base de datos (Vilímek et al., 2012) durante el periodo 1971-2009. La probabilidad definida con estas fuentes de información no



Figura 16. Presentación de los resultados del proyecto en la asamblea comunal de Rampac Grande en 2017.

refleja el efecto de los terremotos que pueden ocasionar numerosos deslizamientos porque no es posible predecir su ocurrencia.

Las zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa son sectores cercanos al arranque principal y también al final del cono deyectivo, a donde puede lle-

gar el material desplazado en el futuro. Para definir estas zonas hemos analizado los eventos pasados que nos dan información sobre el “run-out” y retroceso del escarpe principal. Esta información sirvió para obtener el mapa de peligros por movimientos en masa (deslizamientos) (Figuras 17 y 18).

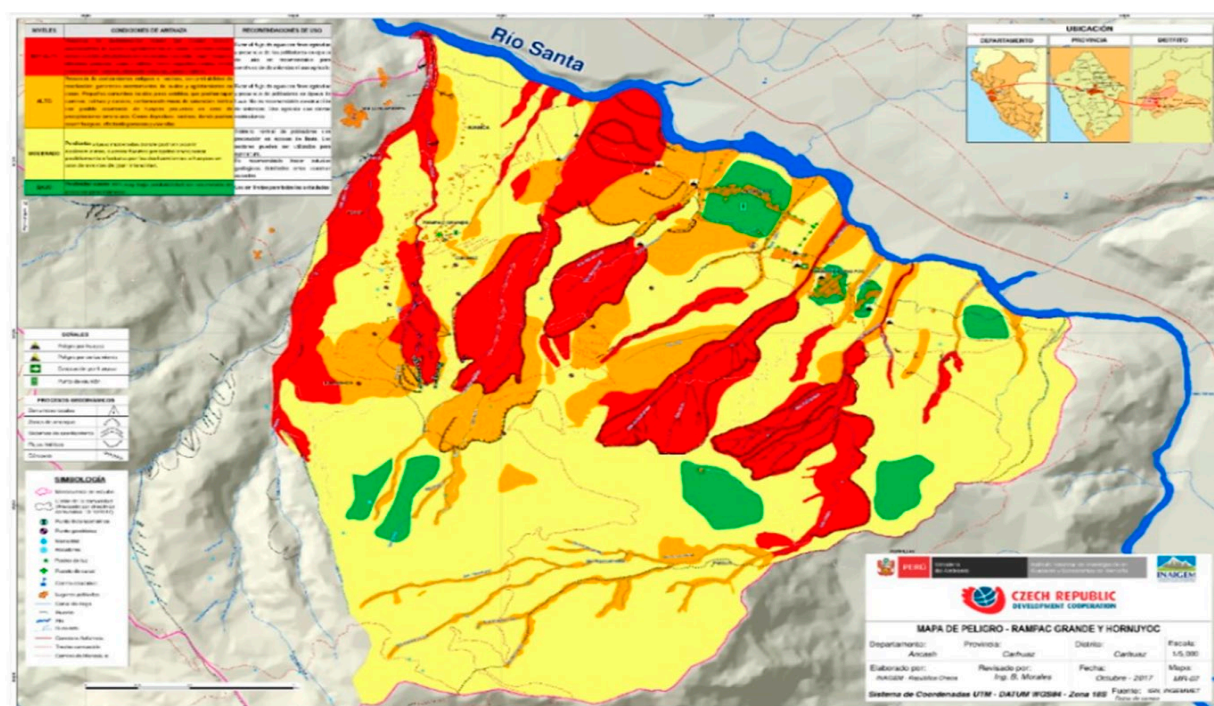


Figura 17. Mapa de susceptibilidad a peligros por movimientos en masa en la zona de Rampac Grande y Hornuyoc, escala 1/25,000. Fuente: INAIGEM 2017.

Nivel	Condiciones de Amenaza	Criterios para Definir los Niveles de Susceptibilidad (Condiciones Naturales del Terreno)				Recomendaciones de Uso
		Geología	Geomorfología	Geodinámica	Otros	
Muy Alto	Presencia de deslizamientos activos que pueden producir asentamientos de suelos y agrietamientos en casas. Cárcavas activas donde ocurren desplazamientos de laderas y pueden ocurrir huaycos, afectando a personas, casas y cultivos. Conos deyectivos activos, donde podrían ocurrir huaycos, afectando a personas, casas y cultivos.	Depósitos de deslizamiento con material no consolidado, compuesto por arenas, arcillas y fragmentos sueltos de roca.	Superficies muy empinadas con huellas de deslizamientos recientes. Laderas de montaña muy inestables con plataformas escalonadas y niveles de asentamientos anteriores.	Derrumbes y deslizamientos activos con zonas de arranque, grietas abiertas y flujos hídricos (presencia de filtraciones y manantiales).	Saturación hídrica en época de lluvia. Actualmente, sin cobertura vegetal, conformando fondos de quebrada muy activos.	Evitar el flujo de agua con fines agrícolas y tránsito restringido para la población. No es recomendable para construcción de viviendas ni uso agrícola.
Alto	Presencia de deslizamientos antiguos e inactivos, con probabilidad de reactivación generando asentamientos de suelos y agrietamientos en casas. Pequeños derrumbes locales, poco estables, que podrían afectar caminos, cultivos y canales, conformando zonas de saturación hídrica con posible ocurrencia de huaycos pequeños en caso de precipitaciones torrenciales. Conos deyectivos inactivos, donde podrían ocurrir huaycos, afectando a personas y viviendas.	Estratos sedimentarios fuertemente meteorizados, compuestos por areniscas, lutitas, calizas y limoarcillitas con algunos horizontes de yeso, originando superficies inestables. Depósitos deyectivos.	Superficies inclinadas con zonas poco estables, laderas empinadas cerca al deslizamiento principal con grietas de separación poco definidas. Probables zonas de reactivación en próximos eventos.	Presencia de deslizamientos antiguos e inactivos, pequeños derrumbes locales poco estables, y grietas poco visibles, conformando zonas de saturación hídrica.	Lluvia intensa en época húmeda y poca cobertura vegetal de protección. Presencia de sectores con uso agrícola.	Evitar el flujo de agua con fines agrícolas y tránsito con precauciones para la población. No es recomendable la construcción de viviendas. Apto para uso agrícola con ciertas restricciones.
Moderado	Pendientes altas o moderadas donde podrían ocurrir deslizamientos durante fuertes precipitaciones. Zonas posiblemente afectadas por deslizamientos o huaycos en caso de eventos de gran intensidad.	Presencia de estratos sedimentarios bien definidos, compuestos por areniscas, lutitas y limoarcillitas, intercalados con horizontes calcáreos con presencia de capas de yeso.	Superficies inclinadas conformando laderas poco empinadas. Presencia de sectores moderadamente estables, protegidos por cobertura vegetal rala.	Huellas de deslizamientos antiguos poco perceptibles. Presencia de superficies poco estables. Procesos geodinámicos poco notables.	Escorrentía superficial moderada en época de lluvia, poca cobertura vegetal, agricultura y presencia de viviendas.	Tránsito normal de la población con precaución en época de lluvia. Los sectores pueden ser utilizados para agricultura. Es recomendable hacer estudios geológicos detallados antes de construir viviendas.
Bajo	Pendientes suaves con muy baja probabilidad de ocurrencia de procesos geodinámicos.	Estratos sedimentarios estables y depósitos cuaternarios semiconsolidados.	Superficies onduladas con baja pendiente.	Ausencia de procesos geodinámicos de importancia.	Terrazas antiguas con buena estabilidad.	Uso sin límites para todas las actividades.

Figura 18. Valoración de criterios para definir el mapa de susceptibilidad. Fuente: INAIGEM, 2017.

Clasificación de los Niveles de Peligro por Movimientos en Masa (Deslizamientos)

Peligrosidad Muy Alta

Sectores con presencia de deslizamientos activos que pueden producir asentamiento de suelos y agrietamiento de casas. Cárcavas activas, donde ocurren desplazamientos de laderas y pueden ocurrir flujos de detritos, posiblemente dañando casas, cultivos y personas. Conos deyectivos activos, donde pueden ocurrir huaycos y destruir casas, cultivos y afectar a personas.

La probabilidad de ocurrencia de estos procesos es muy alta, estimando que cada año pueden reactivarse algunos de los deslizamientos y generar flujos de detritos. En estos sectores se debe evitar el flujo de agua con fines agrícolas y la presencia de los pobladores en época de lluvia. No es recomendable para construcción de viviendas. Uso agrícola limitado.

Peligrosidad Alta

Sectores con presencia de deslizamientos antiguos e inactivos con alta probabilidad de reactivación de asentamientos de suelo y agrietamientos de casas. Pequeños derrumbes locales poco estables, que podrían tapar caminos, cultivos y canales. Zonas de saturación hídrica con posible ocurrencia de huaycos pequeños en caso de precipitaciones torrenciales. Conos deyectivos inactivos.

La probabilidad de ocurrencia de estos eventos es más baja que en el caso anterior, pero de acuerdo al inventario de eventos, se puede observar que en Rampac Grande han ocurrido varios eventos. En estos sectores, se recomienda evitar el flujo de agua con fines agrícolas y la presencia de pobladores en época de lluvia. No es recomendable para construcción de viviendas permanentes, pero permite uso agrícola normal.

Peligrosidad Moderada a Baja

Sectores con pendientes altas o moderadas donde podrían ocurrir deslizamientos por condiciones de alta precipitación. Zonas posiblemente afectadas por deslizamientos o huaycos en caso de eventos de gran intensidad. La probabilidad de ocurrencia de estos eventos es más baja que el anterior, pero falta mayor información para describirlo con mayor detalle.

En estos sectores es normal la presencia de pobladores con precaución en época de lluvia. Es recomendable hacer estudios geológicos detallados antes de construir viviendas, pero permite uso agrícola normal.

Peligrosidad Baja

Sectores con pendientes suaves, con muy baja probabilidad de ocurrencia de algunos procesos geodinámicos.

El uso del territorio no tiene restricciones de uso debido a la baja probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y huaycos.

Conclusiones

- La evaluación geológica, geomorfológica y geodinámica externa y la aplicación de la tecnología SAR para el mapeo del inventario de movimientos en masa demostraron que SAR es muy apropiada para la identificación de deslizamientos, debido a la poca cubierta vegetal y la ausencia de nieve. En tales condiciones, la tecnología SAR demostró ser útil para: i) identificar deslizamientos activos que no son visibles debido a su morfología poco definida, y ii) describir el estado de actividad de los deslizamientos.
- El enfoque 'investigación – acción participativa' aplicado durante todo el proyecto permitió generar información de campo para determinar y caracterizar las áreas de mayor susceptibilidad a movimientos en masa. Las técnicas aplicadas generaron confianza y apertura para la comunicación permanente entre investigadores, líderes locales, gobierno local y funcionarios del gobierno local. Esta información es bastante subjetiva y requiere más trabajo de campo para su verificación. Por lo tanto, el SAR representa una fuente de información confiable que podría replicarse en otros territorios.
- Se determinaron cuatro niveles de peligrosidad en base a las características físicas del terreno y las condiciones de amenaza sobre la población y las actividades agrícolas que se desarrollan. Esta información fue de conocimiento de la población, que aceptaron dichas condiciones.
- Se recomendaron los tipos de uso de suelo y se instaló una adecuada señalización, indicando sectores críticos, rutas de evacuación y puntos de reunión en caso de ocurrir eventos imprevistos. Esta información fue puesta a disposición de las autoridades competentes y su población para su correcto manejo en la gestión del riesgo de desastres.
- El uso de nombres toponímicos facilitó la comprensión del mapa y la fácil ubicación de los puntos de interés.

Referencias

- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. y Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landside hazard. En Carrara, A. y Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical information systems in assessing natural hazards*, 135-175. Dordrecht, Países Bajos, Springer.
- Carey, M., French, A. y O'Brian, E. (2012). Unintended effects of technology on climate change adaptation: An historical analysis of water conflicts below Andean Glaciers.

- Journal of Historical Geography*, 38(2), 181–191.
- Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L. y Lu, P. (2017). Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 4, artículo 9.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N. y Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89.
- Donadei, M. (2019). El papel de la participación en la transición socio-ecológica de la ciudad. *Retos. Revista de Ciencias de la Administración y Economía*, 9(17), 55–70.
- Dueholm, K. S. y Pedersen, A. K. (Eds.). (1992). *Geological analysis and mapping using multi-model photogrammetry*. Rapport 156. Copenhagen, GGU – Geological Survey of Greenland, 72 p.
- Evans, S. G., Bishop, N. F., Fidel Smoll, L., Valderrama Murillo, P., Delaney, K. B. y Oliver-Smith, A. (2009). A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Perú in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108(1-2), 96–118.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carla, R., Rossi, M., Mondini, A. C., Santurri, L., Ardizzone, F. y Guzzetti, F. (2011). Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology*, 129(1-2), 59:70.
- INDECI (2005). *Mapa de peligros – Programa de prevención y medidas de mitigación ante desastres: Ciudades de Yungay y Ranrahirca*. Lima, Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).
- INGEMMET. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Pallasca (17-h), Tayabamba (17-i), Corongo (18-h), Pomabamba (18-i), Carhuaz (19-h) y Huari (19-i)*. Serie A: Carta Geológica Nacional, Boletín 60. Actualizado por la Dirección de la Carta Geológica Nacional a 1995. Lima, Perú, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Klimeš, J. y Vilímek, V. (2011). A catastrophic landslide near Rampac Grande in the Cordillera Negra, northern Peru. *Landslides*, 8, 309–320.
- Klimeš, J., Rosario, A. M., Vargas, R., Raška, P., Vicuña, L. y Jurt, C. (2019). Community participation in landslide risk reduction: A case history from Central Andes, Peru. *Landslides*, 16, 1763–1777.
- McCalpin, J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. En: *Proceedings of the 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, Moscow, Idaho, 99–111.
- Raetzo, H. y Loup, B. (2016). *Protection against mass movement hazards: Guideline for the integrated hazard management of landslides, rockfall and hillslope debris flows*. Bern, Suiza, Federal Office for the Environment (FOEN).
- Schuster, R. L. y Krizek, R. J. (Eds.). (1978). *Landslides: Analysis and control*. Special report 176, Washington, D.C., National Academy of Sciences.
- Smolíková, J. y Loaiza, J. C. (2019). Tipología de los movimientos en masa. En Casamitjana Causa, M. y Sidle, R. C. (Eds.), *Movimientos en masa*, 55–94. Envigado, Colombia, Fondo Editorial EIA.
- Strozzi, T., Ambrosi, C. y Raetzo, H. (2013). Interpretation of aerial photographs and satellite SAR interferometry for the inventory of landslides. *Remote Sensing*, 5(5), 2554–2570.
- Strozzi, T., Klimeš, J., Frey, H., Caduff, R., Huggel, C., Wegmüller, U. y Cochachin Rapre, A. (2018). Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru. *Remote Sensing of Environment*, 217, 111–125.
- Tanaka, M., Zárate, P., Huber, L. y Morel, J. (2011). *Mapa de la conflictividad social en el Perú: Análisis de sus principales causas*. Lima, PrevCon – PCM, 116 p.
- Vilímek, V., Hanzlík, J., Sládek, I., Šandov, M. y Santillán, N. (2012). The share of landslides in the occurrence of natural hazards and the significance of El Niño in the Cordillera Blanca and Cordillera Negra mountains, Peru. En Sassa, K, Rouhban, B, Briceño, S, McSaveny, M. y He, B. (Eds.), *Landslides: Global risk preparedness*, 133–148. Berlín y Heidelberg, Springer.
- Vilímek, V., Klimeš, J., Tito Mamani, R. V., Bastante Abuhadba, J., Astete Victoria, F. y Champi Monterroso, P. Z. (2020). Contribution of the collaborative effort of the Czech WCoE to landslide risk reduction at the Machupicchu [World Heritage Site], Peru. *Landslides*, 17, 2683–2688.
- Wieczorek, G. F. (1984). Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 21(3), 337–342.
- Weston, R. (2008). *Preliminary summary of the Pallcamachay property, Ancash, Peru*. En Report Strait Gold Corp (web last visited 29 April 2010).
- Zamora, M. C. (1966). Deslizamiento de tierras en Rampac Chico (Carhuaz). Informe interno. Huaraz, Ancash, Perú, Electroperú S.A. y Glaciología y Seguridad de Lagunas, 4 p.
- Zapata, M. L. (1972). Deslizamientos de tierras en Rampac Chico, provincia de Carhuaz. Informe interno. Huaraz, Ancash, Perú, Electroperú S.A. y Glaciología y Seguridad de Lagunas. I-Geotec-007, 3 p.

LAS QUEBRADAS QUILLCAYHUANCA Y SHALLAP Y LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA PARA HUARAZ: SUS GLACIARES, LA MINERALIZACIÓN Y LA CALIDAD DE LAS AGUAS

The Quillcayhuanca and Shallap Valleys and Water Problems for Huaraz: Their Glaciers, Mineralization and Water Quality

Benjamín Morales Arnao¹, Jorge Chira Fernández¹, César De la Cruz Poma¹ y Luis Quispe Rentería¹

¹Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Lima

Resumen

Dada la situación crítica en un futuro inmediato del aprovisionamiento ya deficitario de las aguas de la quebrada Cojup, la empresa EPS Chavín (Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento Chavín S.A.), responsable del aprovisionamiento de agua para la ciudad de Huaraz, consideró la necesidad de utilizar las aguas del río Auqui de calidad impropia según los estudios realizados. Así, en octubre de 2021, la empresa solicitó el apoyo del INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), instituto especializado del Sector Energía y Minas, para que efectúe el estudio de la calidad de aguas del río Auqui y le oriente sobre el grado de contaminación, sus causas y las recomendaciones para su remediación. El presente artículo es el resultado resumido del estudio efectuado por un equipo de campo de cuatro especialistas geoquímicos, dos geólogos mineros, un glaciólogo y especialistas de los laboratorios del INGEMMET.

Palabras clave: Cordillera Blanca, mineralización, calidad del agua, Perú

Abstract

Given the critical situation in the immediate future of the already deficient supply of water from the Cojup stream, the EPS Chavín company (Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento Chavín S.A.), responsible for the water supply for the city of Huaraz, considered the need to use the waters of the Auqui River of improper quality, according to the studies previously carried out. Thus, in October 2021, the company requested the support of INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), a specialized institute in the Energy and Mines Sector, to carry out a study of the water quality of the Auqui River and guide the company regarding the degree of contamination, its causes and recommendations for its remediation. This article is the summarized result of the study carried out by a field team of four geochemical specialists, two mining geologists, a glaciologist and specialists from the INGEMMET laboratories.

Keywords: Cordillera Blanca, mineralization, water quality, Peru

Introducción

La ciudad de Huaraz, ha crecido vertiginosamente en los últimos 80 años, paradójicamente a través de dos catástrofes de origen natural que destruyeron la tercera parte de la ciudad en 1941, por efecto de un aluvión proveniente de la rotura del dique morrénico de la laguna Palcacocha, y en 1970, debido al terremoto de mayo de ese año que destruyó el 85% de la ciudad. De una ciudad pequeña que tenía alrededor de 10,000 habitantes antes del aluvión de 1941, creció rápidamente con la reconstrucción a una ciudad del orden de los 25,000 habitantes antes del sismo de 1970.

Nuevamente, por efectos de la reconstrucción de la gran zona afectada por este terremoto y por una creciente actividad turística, la ciudad creció en las últimas décadas hasta una población de más de 122,000 habitantes en 2019.

Esta situación del crecimiento demográfico de la ciudad trajo consigo el crecimiento de los servicios diversos para su atención, entre ellos los servicios del agua potable. Huaraz es atendida en forma regular por las aguas provenientes de la quebrada Cojup, que tiene condiciones adecuadas en su calidad, mas no así en su volumen, ya que el caudal de agua que baja de esta quebrada se ha ido reduciendo cada vez más por efectos de la desglaciación creciente.

Sin embargo, para atender a una ciudad en crecimiento acelerado existen sobre la ciudad de Huaraz tres subcuencas glaciares coronadas por importantes glaciares y lagunas de origen glaciar en sus cabeceras. La quebrada Cojup y la quebrada glaciar Churup, con buena calidad de sus aguas, además de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap, que en conjunto forman el río Auqui, cuyo caudal de agua es tres veces mayor que el de Cojup, pero con una calidad deficiente para el consumo humano por la cantidad de minerales en suspensión que contiene.

En 2013, entre los meses de marzo, julio y noviembre, se realizó un importante estudio denominado "Calidad de agua en cabeceras de cuencas altoandinas en el contexto de cambio climático. Una aproximación para evaluar la calidad del agua y potencial remediación en la subcuenca

de Quillcay” (Loayza, 2014). Este estudio del Ministerio del Ambiente, financiado por el USAID, determinó la presencia de minerales pesados diversos en las aguas de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap, resultado de la lixiviación de áreas mineralizadas que afectan la calidad de estas aguas, siendo impropias para el consumo humano, agrícola y de los animales.

En 2016, la Comunidad Campesina Cordillera Blanca en la cuenca hidrográfica del río Negro en Olleros, con el financiamiento del USAID y la intervención en los estudios del Instituto de Montaña, de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) y de los miembros de la comunidad campesina, desarrolló un proyecto para determinar la calidad de las aguas, encontrando contenidos de hierro (Fe), calcio (Ca), plata (Ag) y cromo (Cr). Para purificar el agua, se aplicaron saberes andinos, construyendo pozos de agua de 4x10 m, donde los minerales pesados se depositaban. Se complementó la purificación de las aguas con humedales naturales y sembríos de totorales, cuyas raíces absorben los metales (Chávez, 2020).

Del mismo modo, entre los años 2016 y 2017, el INAI-

GEM efectuó estudios sobre la calidad de las aguas de los ríos de Cojup, Quillcayhuanca y Shallap, encontrando condiciones aceptables de las aguas de la quebrada Cojup y contaminación con metales pesados de las aguas que bajan de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap, confirmando los estudios realizados en años anteriores por otras instituciones.

Dada la situación crítica en un futuro inmediato, la empresa EPS Chavín (Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento Chavín S.A.) responsable del aprovisionamiento de agua para la ciudad de Huaraz, consideró la necesidad de utilizar las aguas del río Auqui, de calidad impropia según los estudios realizados. Así, en octubre de 2021, la empresa solicitó el apoyo del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), instituto especializado del Sector Energía y Minas, para que efectúe el estudio de la calidad de aguas del río Auqui y le oriente sobre el grado de contaminación, sus causas y las recomendaciones para su remediación. El presente trabajo es el resultado resumido del estudio efectuado por un equipo de campo de cuatro especialistas geoquímicos, dos geólogos mineros, un glaciólogo y especialistas de los laboratorios del INGEMMET.

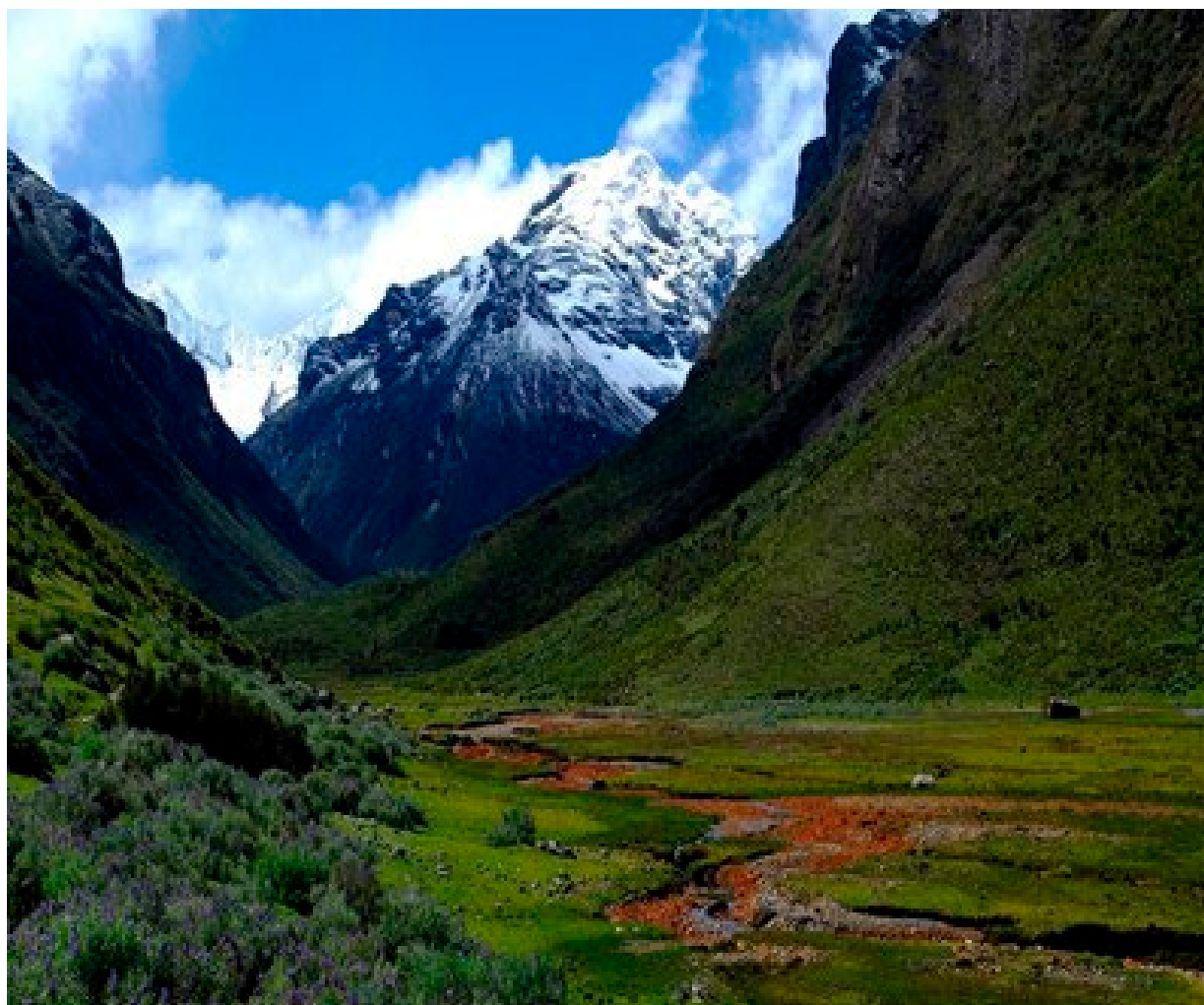


Figura 1. Quebrada Quillcayhuanca con los nevados Andavite (5518 m s.n.m.) y Tullparaju (5787 m s.n.m.) al fondo.

Situación Geográfica

El área de estudios se encuentra en la cabecera de la ciudad de Huaraz, distante 400 km al norte de Lima. Para llegar a los valles glaciares de Quillcayhuanca y Shallap, se dispone de cómodas vías de acceso hasta la portada de estas quebradas, en recorridos de una hora en carro, y desde este punto se sigue a pie o en acémilas en jornadas de dos a tres horas hasta el fondo de los valles.

Las quebradas Quillcayhuanca y Shallap representan uno de los mejores ejemplos de geomorfología glaciér en el Perú, con sus formas típicas de valles en U, valles colgados en sus flancos, lagunas glaciares en su cabecera y grandes superficies glaciares que se elevan desde los 4900 hasta más de 6000 m s.n.m. en ambos valles. Se puede apreciar muy bien morrenas laterales y frontales que sirven de dique natural a las lagunas de Tullparaju y Cuchillacocha en la quebrada Quillcayhuanca y la laguna Shallap en la quebrada del mismo nombre.

Debido a situaciones de riesgo de aluviones de estas lagunas por efecto de avalanchas de hielo de los glaciares, se construyeron obras de prevención, procediéndose al desagüe de los niveles en peligro y la construcción de diques de mampostería de piedra y concreto, así como conductos cubiertos de 1.80 m de alto por donde se evacuan las aguas de fusión de los glaciares que ingresan a estas lagunas (Lliboutry et al., 1977; Ames y Francou, 1995). Las aguas de fusión se evacuan a través de los desagües de las lagunas y de los valles colgados de los flancos, por riachuelos que bajan por el centro de las quebradas hacia

las partes inferiores, juntándose los riachuelos de Churup, Quillcayhuanca y Shallap en la parte intermedia de la cuenca, formando el río Auqui que baja a la ciudad de Huaraz y, juntando con el río Paria proveniente de la quebrada Cohup al norte, la atraviesa por su parte central con el nombre de río Quillcay.

Es de resaltar la gran biodiversidad existente en estas quebradas, desde bosques nativos de quenuales, bofedales, arbustos de diverso tipo y pastos naturales que sirven de alimento a una gran cantidad de ganado vacuno, caballar y lanar principalmente, que pastan libremente en estas quebradas. Debido a su altitud superior a 4000 m, no hay cultivos de pan llevar dentro de las quebradas, solo se encuentran en su parte intermedia y baja hasta la ciudad de Huaraz.

Geología

El área de estudio está constituida por rocas intrusivas correspondientes al batolito de la Cordillera Blanca, rocas sedimentarias representadas por la formación Chicama, así como por depósitos fluvio-glaciares y aluviales. Todas estas fueron emplazadas durante el Jurásico Superior al Cuaternario (Figura 2).

Las cabeceras de las quebradas Cuchillacocha y Cayesh, en el extremo superior de la quebrada Quillcayhuanca, y Shallap se caracterizan por estar conformadas por rocas sedimentarias de la formación Chicama, constituida por areniscas blancas cuarzosas de grano fino a muy fino en la base, seguida por areniscas grises de grano fino a

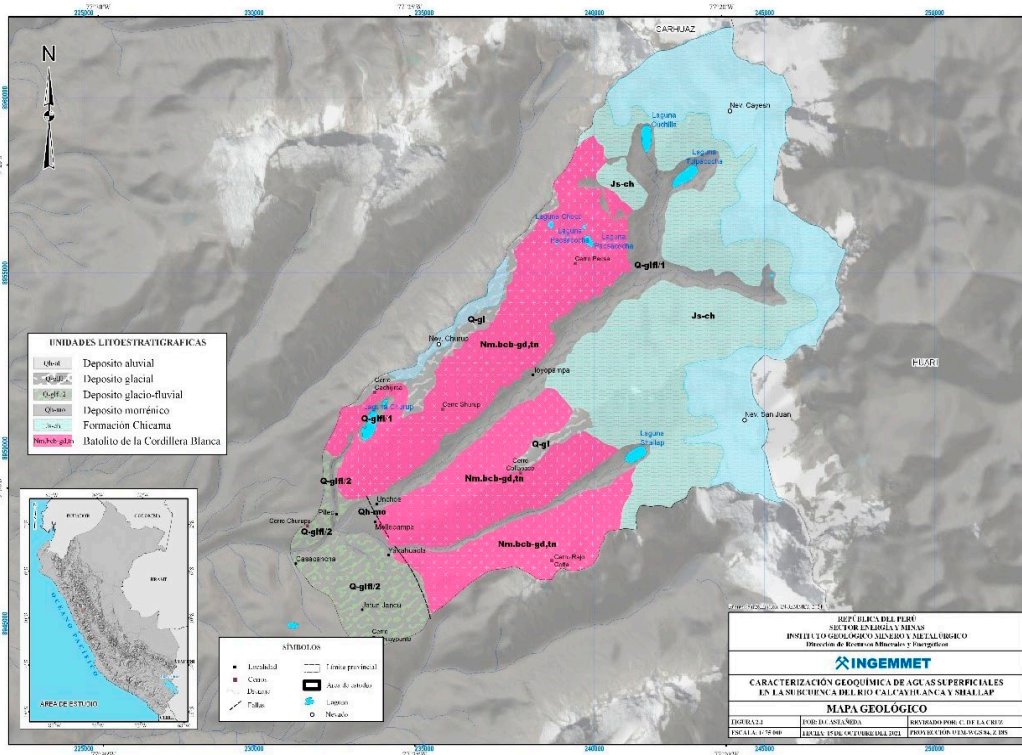


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio.

muy fino con intercalaciones de lutitas color gris oscuro y eventuales niveles de lutitas carbonosas hacia el sector este y sureste de las quebradas Cuchillacocha y Cayesh. Las areniscas grises de grano fino presentan una fuerte piritización de hasta 10%, así como pátinas de óxidos de hierro (predominantemente goetita) asociada a los planos de estratificación y discontinuidades. Por otro lado, también se evidencian estratos de hasta dos metros de grosor de areniscas blancas cuarzosas ligeramente recristalizadas, las cuales se encuentran intercaladas con niveles de lutáceos gris oscuro a negros con espesores de entre 5 a 20 cm. Esta formación se encuentra en contacto con las granodioritas del batolito de la Cordillera Blanca, que aflora a lo largo de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap. Este batolito tiene una longitud de 200 km de largo y entre 12 a 15 km de ancho, regionalmente descrito como una granodiorita leucócrata de grano grueso (Dalmayrac, 1974). Se encuentra limitado al oeste por el sistema de fallas de la Cordillera Blanca, mostrando foliación bien desarrollada en determinados sectores (Wilson et al., 1967). La edad considerada para el batolito varía de 4.6 Ma a 16 Ma, determinada por el método K/Ar en biotitas (Cobbing et al., 1996).

En el área de estudio, el batolito de la Cordillera Blanca presenta una composición granodiorítica, siendo de naturaleza calcoalcalina de grano grueso con débil venilleo de cuarzo y venillas aplíticas centimétricas (de hasta 5 cm de ancho). Presenta débil foliación subhorizontal y, al igual que la formación Chicama, se encuentra intruido por diques de composición dacítica y andesítica de rumbo NNO - SSE. Asimismo, se evidenció en la quebrada Shallap la presencia de un intrusivo (¿megaxenolito?) diorítico-monzodiorítico ligeramente cloritizado.

En las laderas de montaña de las zonas glaciales se encuentran los depósitos fluvio-glaciales, conformados por materiales de morrenas que han sido retransportados por acción fluvial o por gravedad. Los materiales son heterogéneos de gravas subredondeadas en matriz areno-limosa, de potencia y permeabilidad variable, medianamente compactos. Finalmente, se encuentran los depósitos aluviales conformados por llanuras aluviales y terrazas a diferentes niveles sobre los valles principales y tributarios mayores. Al pie de las lagunas, sus depósitos se caracterizan por estar erosionados por los cauces actuales y, generalmente, corresponden a una mezcla heterogénea de arenas, limos y clastos redondeados depositados en las terrazas, presentando espesores de 15 a 25 m (Navarro et al., 2009).

Hidrografía y Climatología

La Cordillera Blanca es una de las reservas hídricas de mayor importancia del Perú, por poseer la más grande superficie y el mayor volumen de glaciares del país. Sus aguas de fusión alimentan al río Santa, que es el de mayor caudal de la cuenca del Pacífico. Las quebradas Quillcayhuanca y Shallap están entre los principales afluentes de este río. El Santa contribuye al desarrollo de las principales ciudades

del Callejón de Huaylas, Chimbote y Trujillo y es fundamental en la producción energética y agrícola de la costa y sierra de los departamentos de Ancash y La Libertad.

Las condiciones climáticas son las típicas de la serraña de los Andes peruanos, con precipitaciones entre noviembre y abril y época seca de mayo a octubre. La precipitación anual sobre los 4000 m es del orden de 800 mm.

Las aguas de fusión de los glaciares de Pucaranra (sobre la laguna Cuchillacocha), las de Tullparaju y Chinchey (sobre la laguna Tullparaju) y las del nevado Cayesh bajan sobre la quebrada Quillcayhuanca, así como las aguas de fusión de los glaciares del nevado San Juan (sobre la laguna Shallap) y del nevado Churup, y constituyen aportes hídricos de gran significación para la ciudad de Huaraz. Son fuentes de aprovisionamiento hídrico a largo plazo, con caudales medios del orden de 4 a 6 m³ por segundo en la época seca y de más de 8 m³ por segundo en la época de precipitaciones.

En cuanto a las temperaturas podríamos indicar que en Huaraz se puede tener una máxima de 24 °C al mediodía y una mínima de 2 °C en las noches y madrugada, mientras que en la quebrada Quillcayhuanca, la temperatura máxima es de 14 °C y la mínima de -3 °C. En la lengua glaciar Chaupijanca Norte de la Cordillera Huallanca, a 4800 m s.n.m., se registró una máxima de 13 °C a mediodía y una mínima de -5 °C entre las 6 y las 7 a.m. (Morales Arnao, 2015). En el frente glaciar del Huascarán, a 4998 m s.n.m., la expedición del INAIGEM en 2017 registró una temperatura máxima de 8.5 °C a medio día y -6 °C entre las 6 y las 7 a.m. (INAIGEM, 2017).

Los Glaciares

La Cordillera Blanca como unidad geográfica constituye la mayor reserva glaciar de agua dulce entre las cordilleras tropicales del mundo. En el Perú, es la fuente del río Santa, el más caudaloso y de régimen más constante de la costa del Pacífico, siendo los glaciares de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap unos de sus principales contribuyentes.

De acuerdo con el inventario de glaciares del Perú publicado por el INAIGEM (2018), la Cordillera Blanca, en el lapso de 54 años entre 1962 y 2016, perdió el 38.20% de su superficie glaciar por efecto de los cambios climáticos, especialmente por el incremento de la temperatura y por causas antrópicas (Figura 3). De 726.26 km² en 1962, se redujo a 448.61 km² en 2016. La tendencia muestra una tasa de retroceso glaciar de 4.97 km²/año. A este ritmo de desglaciación, los glaciares de la Cordillera Blanca desaparecerían en el año 2111, siempre y cuando el mundo cumpla con el control de las emisiones de efecto invernadero para no incrementar la temperatura más de una tasa máxima de 2 °C en el presente siglo.

Por efectos de la desglaciación que está ocurriendo, los glaciares de menor altura de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap desaparecieron y dejaron al descubierto al lecho



Figura 3. Reducción glaciar en la Cordillera Blanca.

rocoso de las areniscas grises de grano fino de la formación Chicama. Estas areniscas contienen una fuerte pirritización, así como pátinas de óxido de hierro que, al estar desprotegidas por el manto de hielo que las cubría y estar en contacto con el medio ambiente y la acción del agua, generan un proceso de lixiviación de esta zona mineralizada, contaminando las aguas de los ríos Quillcayhuanca y Shallap (Figuras 2 y 9).

Investigaciones en la Lengua Glaciar de Chaupijanca Norte

Tomamos como referencia las investigaciones realizadas entre 2007 y 2021 del glaciar Chaupijanca Norte (Morales Arnao, 2015) en la Cordillera Huallanca, vecina hacia el este de la Cordillera Blanca, la que nos muestra los siguientes registros sobre temperatura, fusión, acumulación, retroceso glaciar, línea de equilibrio y balance de masas (Figuras 4 y 5).

Las investigaciones realizadas en la lengua glaciar de Chaupijanca Norte entre los 4700 a 5200 m s.n.m. evidencian que la fusión o ablación anual a 4750 m s.n.m. es del orden de - 5.0 m. La línea de equilibrio está a 4850 m s.n.m. y la acumulación anual a 5150 m s.n.m. es del orden de 2.8 m, mientras que el retroceso glaciar anual es del orden de 20 m. Estas magnitudes podrían considerarse aplicables en la Cordillera Blanca, pudiendo encontrarse diferencias en más o en menos dependiendo de la exposición del glaciar. Con un constante balance glaciar anual negativo, la Cordillera Huallanca perdió el 75% de su superficie glaciar en el lapso de 54 años, entre 1962 y 2016, pudiendo desaparecer totalmente en el año 2040.

Es conveniente indicar que los glaciares se modifican y disminuyen su superficie de acuerdo con la altura donde se encuentren y a su superficie glaciar. A menor altura y

superficie los cuerpos glaciares son mucho más sensibles a los efectos de los cambios climáticos. Por esta razón, las cordilleras glaciares que tengan su superficie glaciar a mayor altura son los que perdurarán mayor tiempo frente a los efectos del cambio climático.

Si bien los glaciares significan fuente de recursos hídricos fundamentales para la supervivencia y desarrollo de la sociedad, también son fuente de tremendas catástrofes producidas por avalanchas de hielo y la rotura de sus diques morrénicos, ocasionando avalanchas de hielo como las de Huascarán en 1962 y 1970 o aluviones como el de la laguna Palcacocha en 1941 sobre la ciudad de Huaraz (Figura 6).

Los factores de la conformación geomorfológica de grandes desniveles en cortos espacios, del cambio climáti-

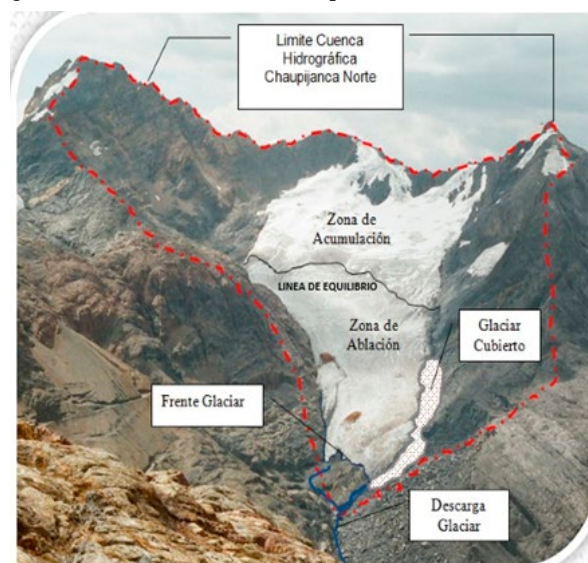


Figura 4. Lengua glaciar Chaupijanca Norte.

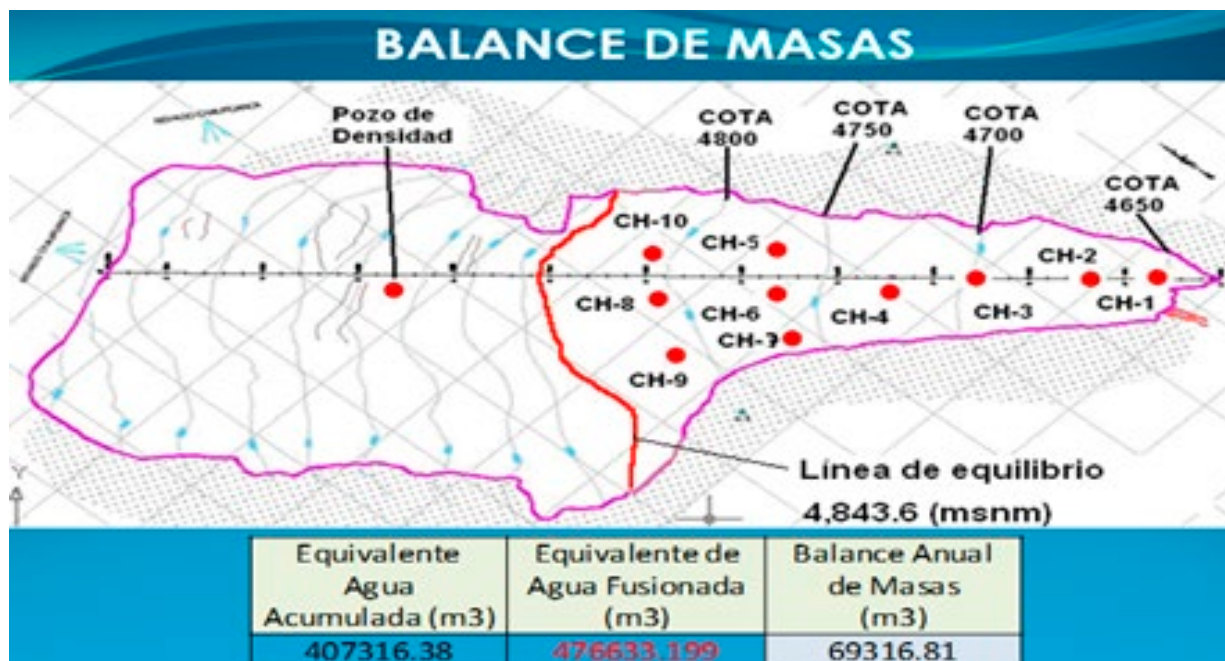


Figura 5. Línea de equilibrio del glaciar Chaupijanca.

co y de la sismicidad han sido la causa de la producción de la mayor cantidad de desastres de origen glaciar ocurridas en la Cordillera Blanca, con registros desde 1725 hasta el presente. Se puede verificar que en las últimas décadas del presente siglo se han incrementado las situaciones de inestabilidad de estos glaciares.

Esta realidad dio la oportunidad a la ingeniería nacional para diseñar medidas de prevención de gran efectividad a fin de evitar catástrofes de este tipo, efectuando los desagües de volúmenes peligrosos en lagunas glaciares y construyendo presas de seguridad a lo largo de toda la

Cordillera Blanca. Se han construido 34 obras de prevención que son un ejemplo de efectividad y un modelo a nivel internacional. Precisamente este tipo de acciones ocurrió en las lagunas de Cuchillacocha y Tullparaju, donde se desaguaron volúmenes peligrosos de agua y se construyeron sendas obras de prevención. Del mismo modo, en la quebrada Shallap se desaguó y construyó la obra de prevención. Estas acciones, sin duda, le han dado seguridad y tranquilidad a Huaraz. Se puede observar en la Figura 7 la laguna Shallap con su dique construido, así como el dique de Cuchillacocha y el bosquejo del tipo de obras de prevención construidas en la Cordillera Blanca.



Figura 6. Aluvión de la laguna Palcacocha 1941. Fuente: Wegner, 2014, 3 y 19.

Calidad de las Aguas

Como se ha indicado en la introducción, desde el año 2013 hasta el año 2017 se han realizado importantes estudios efectuados por misiones extranjeras y nacionales con la intervención de diversas universidades, institutos de investigación y miembros de comunidades locales para

determinar la calidad de las aguas de los ríos Cojup, Quillcayhuanca y Shallap. Estos estudios probaron la calidad aceptable de las aguas de la quebrada Cojup y los contenidos de metales en suspensión en las aguas de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap que la hacen impropia para el consumo humano y para la biodiversidad en su conjunto.

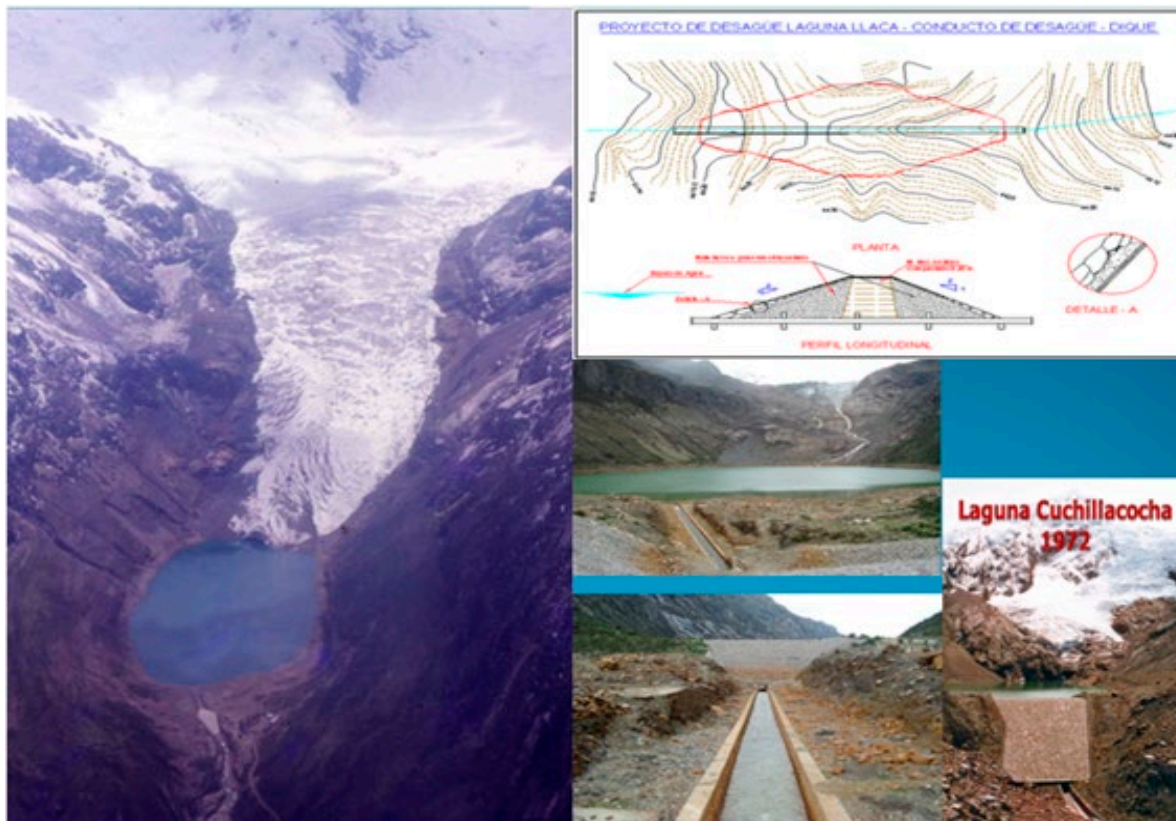


Figura 7. Obras de prevención en las lagunas Shallap y Cuchillacocha.

Teniendo en cuenta que el caudal del río Cojup es insuficiente para atender a la ciudad de Huaraz, se hace indispensable utilizar el agua del río Auqui proveniente de las quebradas Churup, Quillcayhuanca y Shallap. La empresa EPS Chavín solicitó al INGEMMET, como instituto especializado, realizar un estudio más específico para conocer la situación de la calidad de las aguas de estos ríos y sus orígenes y contenidos de los diferentes metales que afectan a estas aguas. Se presentan aquí los resultados de este estudio efectuado por el INGEMMET con el concurso de cuatro geoquímicos, dos geólogos mineros, un glaciólogo y la participación de los laboratorios especializados del INGEMMET.

Afloramientos Minerales

Las areniscas cuarzosas de color gris presentan una mineralización diseminada. Sin embargo, esta no es económica debido a la escasa presencia de minerales de mena. Estas rocas presentan unas leyes de <0.5 mg/kg Ag, 12 a 89 mg/kg Cu, <5 a 8 ppm de Pb y de 31 a 116 mg/kg de Zn.

Una de las principales evidencias de mineralización en la zona se da en las nacientes de las quebradas Quill-

cayhuanca y Shallap, asociadas a las rocas sedimentarias de la formación Chicama, específicamente a las areniscas grises finas, las que evidencian una fina diseminación de pirita de hasta 10%. Así mismo, se han evidenciado venillas de pirita y galena subeuhedral en la quebrada Shallap en rodados de areniscas de grano fino con abundantes pátinas de goetita y turgita. Por otro lado, se ha reconocido un antiguo cateo minero artesanal (Figura 8), de un ancho de 80 cm y una profundidad de aproximadamente cinco metros, que sigue una estructura brechoide conformada por cuarzo hialino, pirita y goetita, asociadas a fallas de rumbo N-S en la convergencia de las quebradas Cayesh y Cuchillacocha. Los valores arrojados en dicha estructura son de 10.10 mg/kg Ag, 1580 mg/kg de Cu, 64 mg/kg de Pb, 575 mg/kg de Zn y 11.37% de Fe.

Además, se evidencia la presencia de ferricretas (Figura 9) asociadas a las intercalaciones de areniscas grises piritizadas con intercalaciones de lutitas grises en contacto con los sistemas de falla NNO-SSE, pátinas de jarosita, goetita y sulfatos de hierro en planos de discontinuidades. Las leyes reportadas en las ferricretas son de <0.5 mg/kg de Ag, 7 mg/kg de Cu, <5 mg/kg de Pb, 54 mg/kg de Zn y 48.21% de Fe.



Figura 8. Antiguo cateo minero en convergencia de las quebradas Cayesh y Cuchillacocha.

En cuanto a los intrusivos del batolito de la Cordillera Blanca, ellos presentan una débil diseminación de pirita con o sin calcopirita, incrementándose en contacto con las rocas sedimentarias. Además, es posible encontrar un débil venilleo densimétrico de cuarzo, así como de venillas aplíticas.

En lo que concierne a la alteración, se trata de una moderada a fuerte silicificación tanto en las rocas intrusivas

del batolito de la Cordillera Blanca y los diques andesíticos y dacíticos, como en las areniscas y lutitas de la formación Chicama. Estas últimas presentan una fuerte limonitización en contacto con las rocas intrusivas y los sistemas de falla NNO-SSE, así como una moderada a débil recristalización. Del mismo modo, se evidencia también la presencia de hornfels de biotita y clorita en contacto con las rocas intrusivas, acompañadas de una débil a moderada piritización diseminada (Figura 10).



Figura 9. Ferricretas asociadas a las areniscas grises piritosas y lutitas grises de la formación Chicama en la quebrada Cayesh.

La lixiviación de los sulfuros presentes en estas rocas sedimentarias es la causa de la formación de las ferricretas, así como del alto contenido de hierro y los bajos valores de pH de las aguas en las quebradas Quillcayhuanca y Shallap.

Mediciones Geoquímicas

El INGEMMET, a través de la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos, realizó la caracterización geoquímica y calidad química de aguas superficiales de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap en la provincia de Huaraz. Este estudio permitió caracterizar químicamente el tipo de agua superficial y determinar la calidad del agua que discurre a lo largo del cauce de las quebradas.

Para tal efecto, se recolectaron 28 muestras de aguas superficiales, 24 correspondientes a muestras de campo y cuatro a muestras de control (dos muestras blanco y dos duplicados) que fueron analizadas en el laboratorio del INGEMMET por aniones, cationes y metales totales. Durante el muestreo geoquímico, en cada estación se tomaron lecturas in situ de los principales parámetros fisicoquímicos de las aguas. Para ello, se empleó el equipo multiparámetro HANNA modelo HI9828. Los parámetros registrados fueron pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (TDS), temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), salinidad, potencial de óxido reducción (ORP), presión y resistividad.

Para determinar la calidad química del agua, se compararon los resultados analíticos obtenidos con los valores del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua en la Categoría 1 y la Subcategoría A1 (Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección), normados por el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, a fin de identificar las fuentes existentes de contaminación que podrían afectar la calidad del agua.

Caracterización Fisicoquímica de Aguas Superficiales

Sobre la base de los datos obtenidos, se caracterizaron las condiciones fisicoquímicas del ambiente por donde discurren las aguas superficiales de las quebradas Shallap y Quillcayhuanca. Según la Figura 11 (pH/ORP), este ambiente fisicoquímico se caracteriza como un ambiente ácido de carácter oxidante, excepto las aguas del tributario Churup, en donde se registró una tendencia a la neutralidad con pH igual a 6.

En la quebrada Quillcayhuanca, el potencial de hidrógeno (pH) varía de 2.93 a 3.83. En este rango, los valores de pH no alcanzan el rango mínimo (6.4-8.5) del ECA para la Categoría 1. Sin embargo, el pH registrado en la quebrada Churup (pH igual a 6) superó el valor mínimo (5.5) para la Subcategoría A3 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado) (Figura 11). Las condiciones más ácidas (pH igual a 2.93 y 3.01) se registraron en el sector de Yupanapampa (19i-AGQ-003 y 19i-AGQ-014) que son alimentadas por aguas de las lagunas Tullparaju y Cuchillacocha en el curso superior de esta quebrada.

El potencial de hidrógeno en la quebrada Shallap varía de 2.89 a 4.96, y al igual que en la quebrada Quillcayhuanca, los valores no alcanzan el valor mínimo del ECA para la Categoría 1 (Figura 12). La condición más ácida de esta quebrada se registró en la estación 20i-AGQ-004, ubicada en el curso medio, en donde se observaron rodados andesíticos oxidados con mineralización de pirita diseminada. Es importante mencionar que en el curso superior de ambas quebradas afloran areniscas cuarzosas con mineralización de pirita diseminada de la formación Chicama. Asimismo, se han evidenciado rodados de areniscas de grano fino y andesitas con mineralización de pirita y pátinas de goetita y turgita, lo cual sugiere que la interacción agua-roca produce la adición de cationes en dichos cursos fluviales.

Los valores de conductividad eléctrica (CE) de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap no superaron el ECA para la Categoría A1 (1500 μ S/cm). Registraron los mayores valores en la cabecera de la quebrada Quillcayhuanca en aguas procedentes de las lagunas Cuchillacocha y Tullparaju y de la quebrada Cayesh. El menor valor de este parámetro se registró en la quebrada Churup. De similar comportamiento a la CE, los valores de los sólidos totales disueltos (TDS) no superan el ECA establecido para Subcategoría A1 (1000 mg/l) en ambas quebradas. Asimismo, no superan el rango establecido como excelente calidad de agua potable por la OMS (Organización Mundial de la Salud) para este parámetro (1000 mg/l).

De las 15 estaciones registradas en la quebrada Qui-

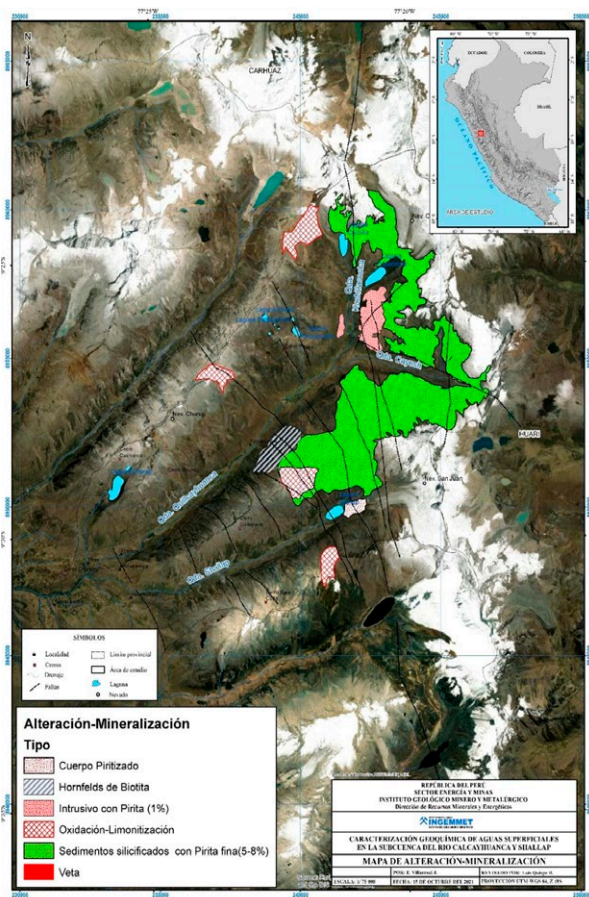


Figura 10. Mapa de alteraciones y mineralización.

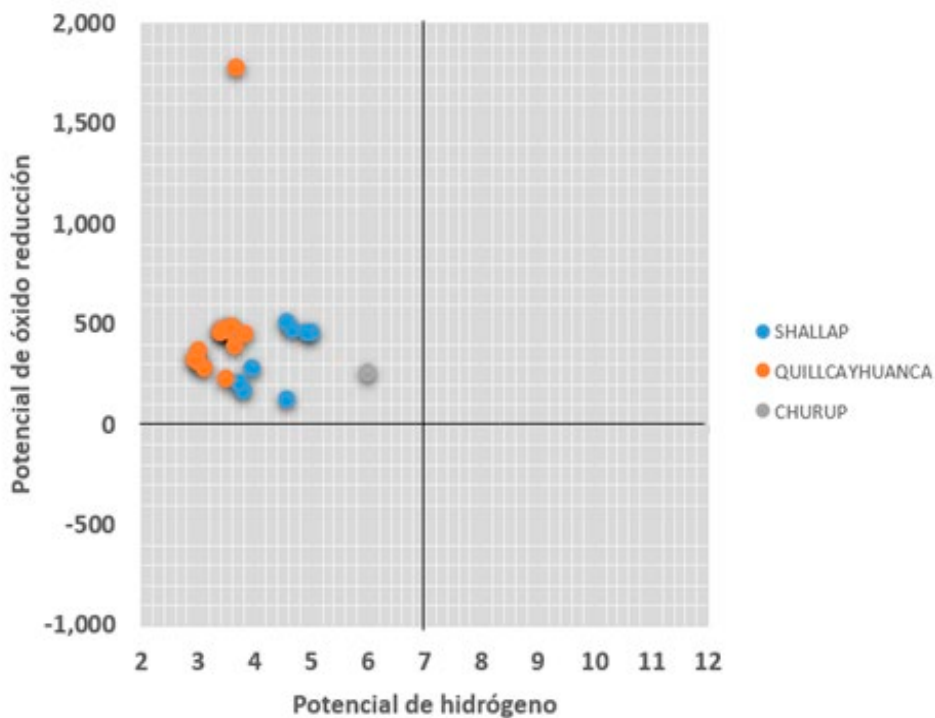


Figura 11. Caracterización fisicoquímica de las quebradas Shallap y Quillcayhuanca.

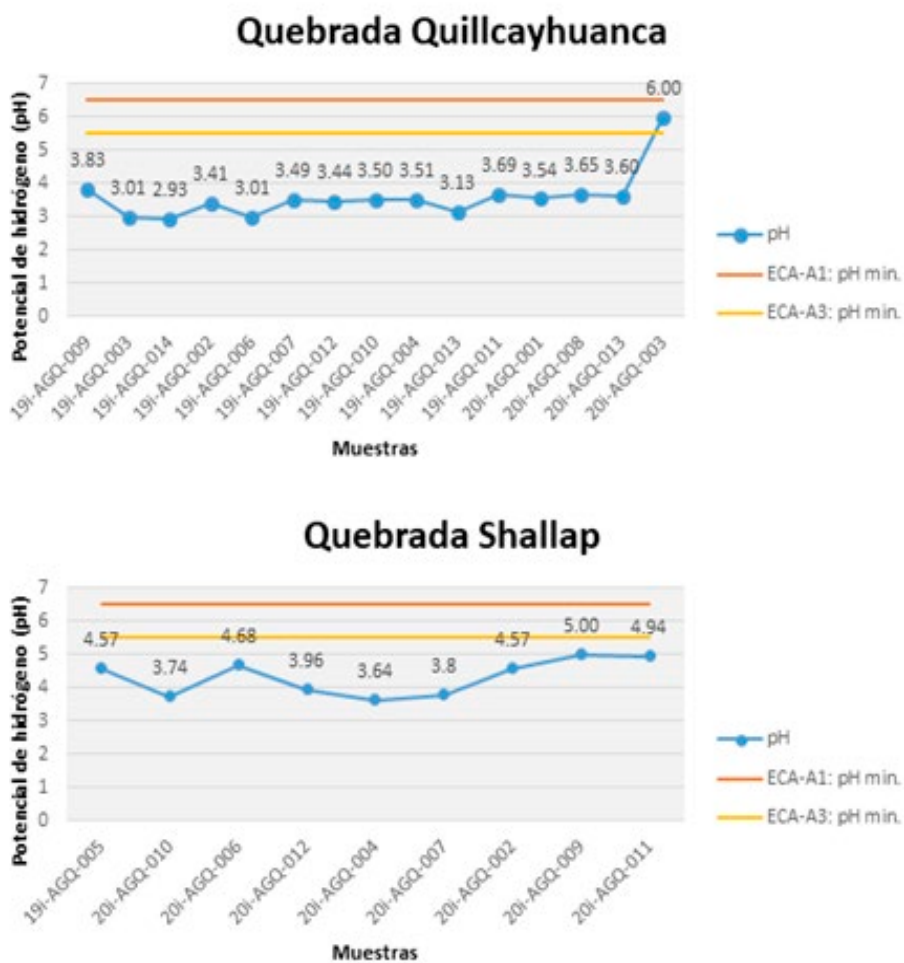


Figura 12. Distribución del potencial de hidrógeno en las quebradas Quillcayhuanca y Shallap.

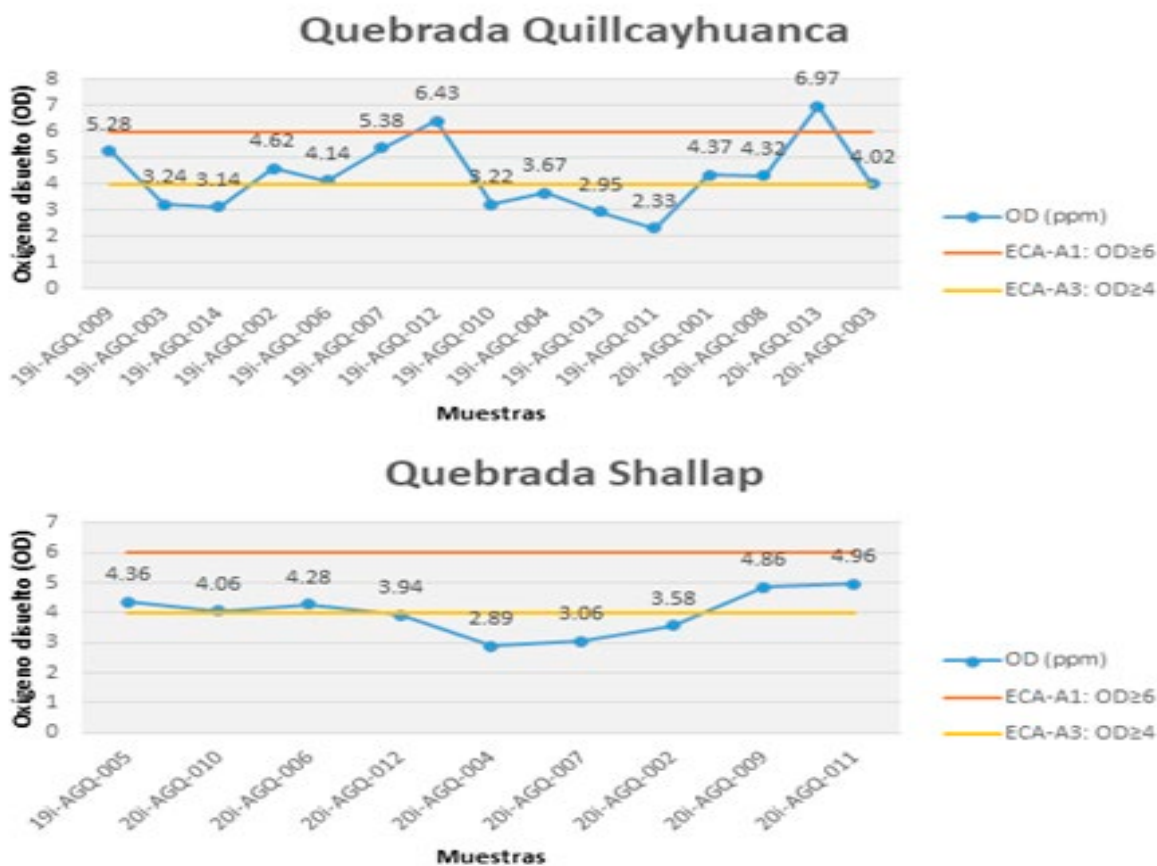


Figura 13. Distribución de oxígeno disuelto en las quebradas Quillcayhuanca y Shallap.

llcayhuanca, nueve (9) valores de oxígeno disuelto (OD) han superado el valor establecido en el ECA. Las estaciones 19i-AGQ-009, 19i-AGQ-002, 19i-AGQ-006, 19i-AGQ-007, 20i-AGQ-001, 20i-AGQ-008 y 20i-AGQ-003 superaron el valor para la Subcategoría A3 (≥ 6 mg/kg) y en 19i-AGQ-012 y 20i-AGQ-013 para la Subcategoría A1 (≥ 4 mg/kg) (Figura 13). En la quebrada Shallap, para la Subcategoría A3 (≥ 6 mg/kg), este parámetro se superó en cinco estaciones: tres ubicadas en el curso superior y dos antes de la confluencia con la quebrada Quillcayhuanca.

Caracterización Química y Calidad de Agua

Para la caracterización química de las aguas superficiales, se analizaron los aniones y cationes. Según el diagrama de Piper, las aguas superficiales de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap se caracterizan como aguas sulfatadas cálcicas, mientras que las aguas de la quebrada Churup como bicarbonatada cálcica (Figura 14). El patrón general de la química de las aguas consiste en mayor proporción de sulfatos y en menor abundancia de calcio y magnesio. En las estaciones estudiadas de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap, se encuentra el mismo patrón composicional, con contenidos del anión $SO_4 =$ de hasta 181.10 mg/l para la quebrada Quillcayhuanca y de 78.8 mg/l para la quebrada Shallap.

Respecto a la calidad química del agua, se evaluaron los elementos aluminio (Al), antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), boro (B), cadmio (Cd),

cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), uranio (U) y zinc (Zn) en las quebradas Quillcayhuanca y Shallap. Es importante mencionar que las concentraciones de Sb, As, B, Cr y Se están por debajo del límite de detección analítica.

Considerando los estándares de calidad ambiental (ECA) para la Subcategoría A (Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable), se determinó que los elementos Al, Fe, Mn y, de manera puntual el Ni, superaron los valores máximos establecidos en la norma peruana (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM) (Figura 15). A continuación, se describe cada uno de ellos.

Aluminio

El límite establecido para el aluminio para la Subcategoría A1 (Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección) es de 0.9 mg/l. Las concentraciones de aluminio en las quebradas Quillcayhuanca y Shallap superaron hasta más de tres veces este valor, registrándose el mayor valor (3.902 mg/l) en la quebrada Cayesh (19i-AGQ-002) a 2.5 km aguas abajo de la cabecera de la quebrada. En la quebrada Shallap, el mayor valor de aluminio se cuantificó a un kilómetro aguas abajo de la laguna del mismo nombre.

Hierro

El hierro es otro de los elementos que superó el valor máximo del ECA para la Subcategoría A1 (0.3 mg/l). Al igual que el aluminio, en la quebrada Quillcayhuanca este

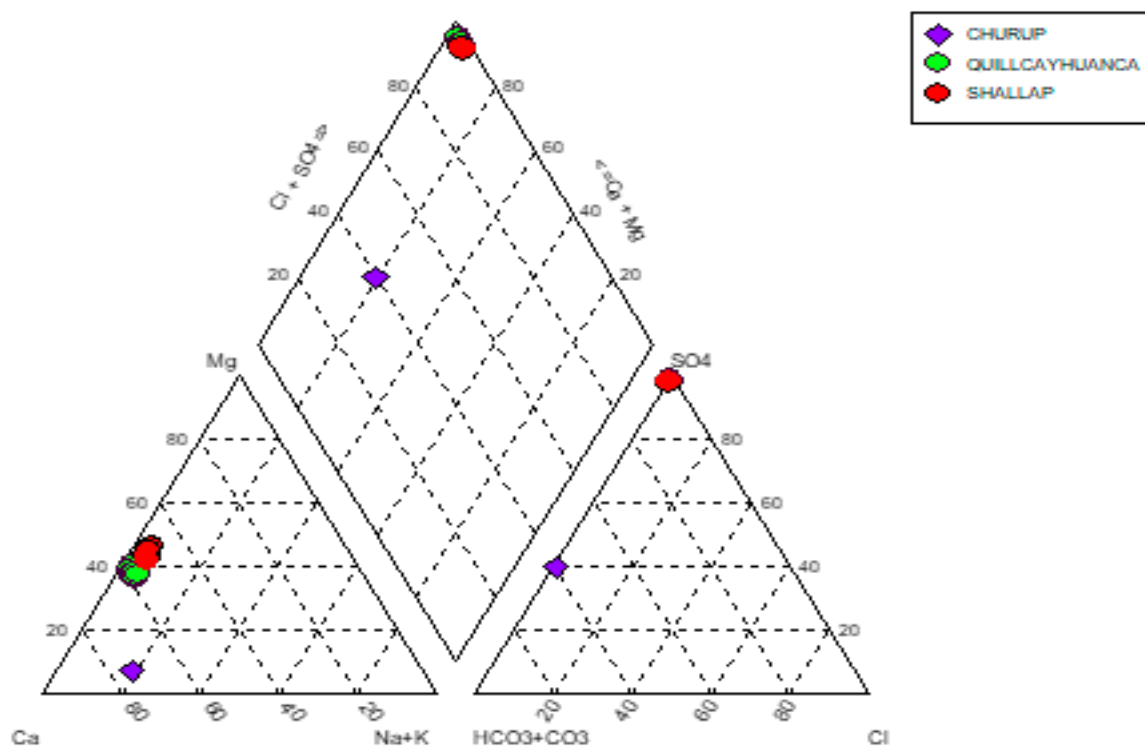


Figura 14. Clasificación de aguas superficiales de las quebradas Quillcayhuanca, Shallap y Churup en el diagrama de Piper.

elemento superó hasta 53 veces el valor establecido en la norma, registrándose la mayor concentración en la quebrada Cayesh (16.35 mg/l y 16.33 mg/l). En la quebrada Shallap, las mayores concentraciones se ubican en el curso superior de la quebrada, mientras que hay una tendencia negativa aguas abajo.

Manganeso

El valor máximo establecido en el ECA para el manganeso es de 0.4 mg/l. La abundancia de este elemento en la quebrada Quillcayhuanca superó el valor referencial hasta en cuatro veces, mientras que en Shallap, hasta en dos veces. Cabe mencionar que en ambas quebradas la tendencia de concentración aguas abajo de este elemento es negativo. De similar comportamiento a los otros elementos descritos, la mayor concentración se registró en la quebrada Cayesh (1.61 mg/l).

Níquel

En la quebrada Quillcayhuanca, el níquel superó el valor máximo del ECA para la Subcategoría A1 (0.07 mg/l) en dos estaciones (19i-AGQ-009 y 19i-AGQ-002) ubicadas en el curso superior de la quebrada Cayesh. En la quebrada Shallap, las concentraciones de este elemento no superaron el valor vigente del ECA.

Propuestas de Solución

El déficit del recurso hídrico en la ciudad de Huaraz ha motivado a la EPS Chavín a considerar el aprovechamiento de las aguas superficiales de las quebradas Quillcayhuanca y Shallap como alternativa para su abastecimiento. Frente a las altas concentraciones en especial de

hierro, manganeso y aluminio presentes a lo largo del cauce de estas quebradas, se requiere plantear alternativas de tratamiento para la remoción de estos elementos y potenciar su uso para agua potable. Planteamos brevemente las siguientes sugerencias.

En el área de la confluencia de los ríos de Quillcayhuanca, Shallap y Churup se encuentran espacios amplios de pendientes manejables, donde bien se podría proyectar estructuras amplias para el tratamiento del agua y como zona de recreación.

Sobre el mejor sistema para el tratamiento de estas aguas contaminadas, la empresa EPS Chavín debe tener y utilizar la tecnología más conveniente. Sin embargo, hay que revisar algunos sistemas ya utilizados en casos similares como el proyecto desarrollado por la Comunidad Campesina Cordillera Blanca para purificar el agua del río Negro en el distrito de Olleros (Chávez, 2020), aplicando saberes ancestrales, construyendo pozas y sembrando plantas que tuvieron un resultado eficaz.

Como referencia, se pueden indicar las siguientes tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas.

Sistemas de oxidación con filtración (Civardi y Tompeck, 2015), con tratamiento sin químicos y con uso de químicos (Figura 16) (Marín Burbano, 2011).

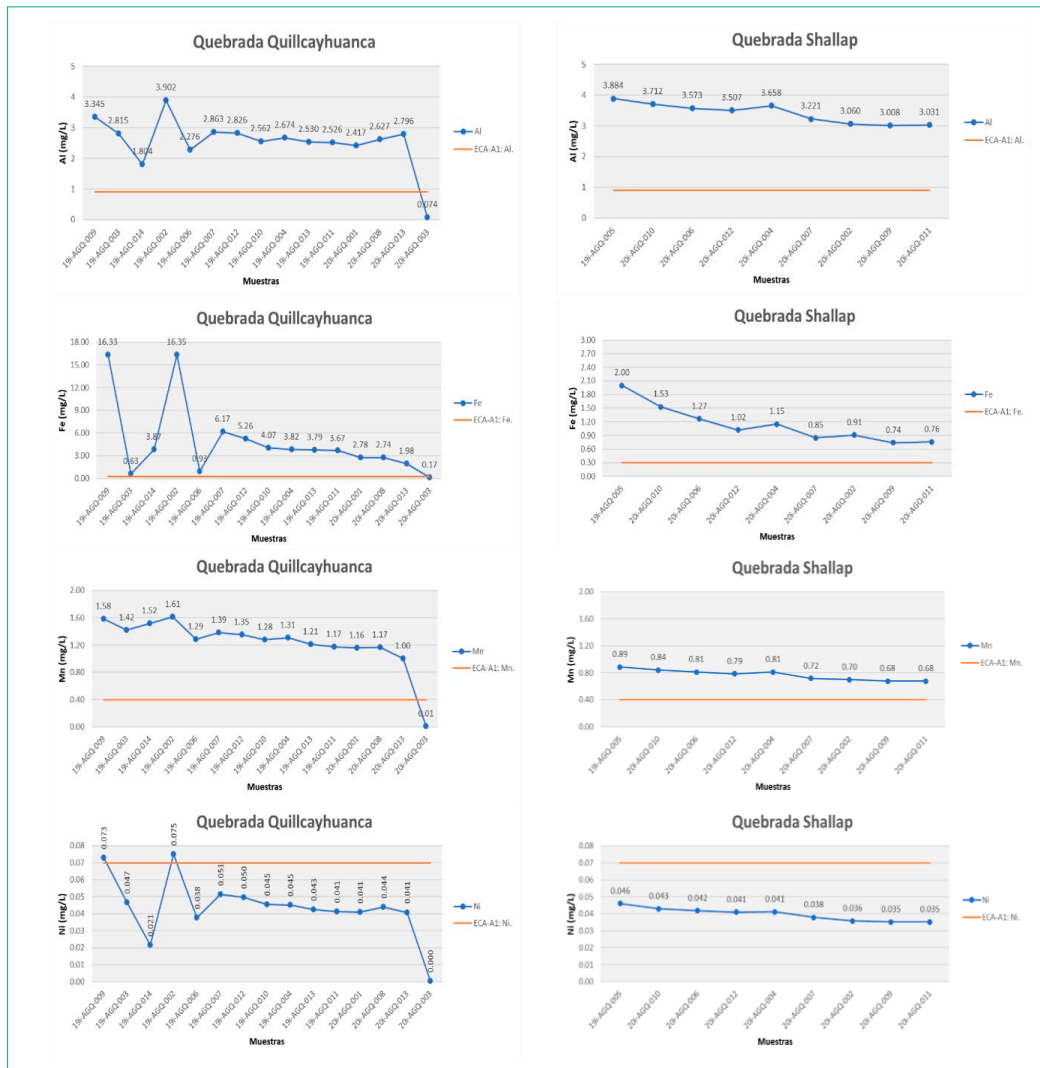


Figura 15. Calidad química de aguas superficiales en las quebradas Quillcayhuanca y Shallap.

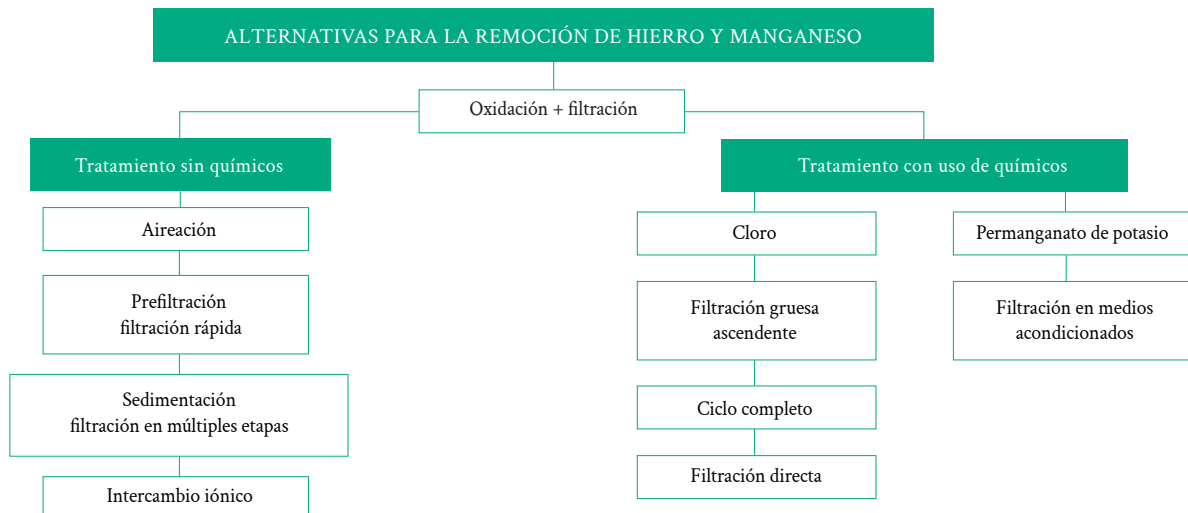


Figura 16. Alternativas de tratamiento (tomado de Martín Burbano, 2011; Civardi y Tompeck, 2015).

Asimismo, los tratamientos biológicos son relevantes especialmente cuando las concentraciones son significativas. La biofiltración consigue además dos cosas fundamentales para ahorrar costos de inversión: trabajar a altas velocidades de filtración (menor superficie filtrante) y trabajar con altas concentraciones de hierro y manganeso (Álvarez, 2020).

Referencias

- Álvarez, C. (2020). Dos enfoques para eliminar hierro y manganeso en agua potable empleando Filtralite® con alta eficiencia y bajos costos. *iAgua Magazine*, 29, 54-57. <https://www.iagua.es/magazine/29>
- Ames, A. y Francou, B. (1995). Cordillera Blanca glaciares en la historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(1), 37-64.
- Chávez, D. (2020). *Biorremediación en la Comunidad Campesina Cordillera Blanca, Perú*. Lima, The Mountain Institute.
- Civardi, J. y Tompeck, M. (2015). *Iron and Manganese Removal Handbook. Second Edition*. Denver, Colorado, American Water Works Association.
- Cobbing, J., Sánchez, A., Martínez, W. y Zárate, H. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca. Hojas: 20-h, 20-i, 20-j, 21-i, 21-j*. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 76. Lima, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Dalmayrac, B. (1974). Un exemple de tectonique vivante: les failles subactuelles du pied de la Cordillère Blanche (Pérou). *Office de la recherche scientifique et technique outre-mer: Serie Géologie*, 6(1), 19-27.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. (7 de junio de 2017). *Normas Legales. Diario Oficial El Peruano*, 10-19. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>
- INAIGEM. (2017). *Expedición científica Huascarán 2017*. Huaraz, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).
- INAIGEM. (2018). *Inventario nacional de glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú*. Huaraz, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A. y Schneider, B. (1977). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, 18(79), 239-254.
- Loayza, R. (2014). *Calidad de agua en cabeceras de cuencas altoandinas en el contexto de cambio climático: Una aproximación para evaluar la calidad del agua y potencial remediación en la subcuenca de Quillcay*. Nota Técnica 2. Lima, Ministerio del Ambiente.
- Marín Burbano, L. M. (2011). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grava*. Tesis de maestría. Cali, Colombia, Universidad del Valle. 92 p.
- Morales Arnao, B. (2015). Investigaciones glaciológicas en los glaciares de Chaupijanca y Pastoruri. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 126, 139-204.
- Navarro, P. A., Rivera, M. A. y Monge, R. W. (2009). Nuevos aportes sobre el volcanismo Cenozoico del Grupo Calipuy en La Libertad y Ancash: Geocronología y geoquímica. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 103, 215-232.
- Wegner, S. A. (2014). *Lo que el agua se llevó: Consecuencias y lecciones del Aluvión de Huaraz de 1941*. Nota Técnica 7. Lima, Ministerio del Ambiente.
- Wilson, J., Reyes, L. y Garayar, J. (1967). *Geología de los cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari (Hojas 17-h, 17-i, 18-h, 18-i, 19-h, 19-i)*. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 16. Lima, Servicio de Geología y Minería.

LOS GLACIARES ESTÁN DESAPARECIENDO Y ANTE SUS CONSECUENCIAS, ¿QUÉ HACEMOS?

The Glaciers Are Disappearing and, in View of Their Consequences, What Do We Do?

César A. Portocarrero Rodríguez¹

¹Ingeniero independiente, Huaraz, Perú

Introduction

This essay is not based on the apocalypse mentioned in the Bible. It is simply the manifestation of a deep concern with knowing the events that have occurred in previous times when climate changes have occurred that totally altered the lives of humans, with stages of famine that even led to cannibalism and the alteration of political, social and economic processes. It is about sharing with the reader that conclusion in light of the knowledge of what has happened historically on our planet when climate changes occur, whether due to the decrease in temperature during cooling or glaciation processes (growth of glaciers) or during the interglacial processes between cooling episodes when the ice masses have retreated, obeying the rise in temperature of the interglacial period. During these intervals, extreme climatic phenomena have occurred, either due to lower than average temperatures ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), very intense rainfall or very prolonged droughts.

Introducción

Este ensayo no está basado en el apocalipsis que menciona la Biblia. Es simplemente la manifestación de una profunda preocupación al conocer los hechos que se han producido en épocas anteriores cuando han ocurrido cambios de clima que alteraron totalmente la vida de los humanos, con etapas de hambruna que llevaron incluso al canibalismo y a la alteración de procesos políticos, sociales y económicos. Se trata de compartir con el lector esa conclusión ante el conocimiento de lo que ha ocurrido históricamente en nuestro planeta al producirse cambios climáticos, ya sea por la disminución de temperatura durante los enfriamientos o procesos de glaciación (crecimiento de los glaciares) o durante los procesos interglaciares entre episodios de enfriamiento cuando las masas de hielo se han retirado, obedeciendo a la elevación de temperatura del período interglaciar. Durante estos intervalos, han ocurrido fenómenos climáticos extremos, ya sea por temperaturas menores al promedio ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), precipitaciones pluviales muy intensas o sequías muy prolongadas.

En estos casos, el desarrollo de las civilizaciones ha sido muy afectado, hasta el extremo de desaparecer, tal como lo menciona Harvey Weiss (2017) en *Megadroughts and*

collapse: From early agriculture to Angkor, donde describe cómo desaparecieron algunas culturas antiguas, entre las cuales podemos mencionar el colapso de la cultura acadia en la Mesopotamia hace 4200 años, y el ocaso de la Edad de Bronce tardía hace 3200 años, cuando ocurrió el rápido enfriamiento de las aguas del mar Mediterráneo, que limitó la evaporación y redujo las precipitaciones pluviales, lo que finalmente afectó a la agricultura. También se cita que el colapso de la cultura Teotihuacán en Mesoamérica entre los años 550 y 600 de nuestra era debido a la dependencia de sus actividades de las lluvias que se ausentaron por un tiempo prolongado. Asimismo, otros ejemplos son los cambios climáticos que originaron la caída de las organizaciones sociopolíticas de la cultura clásica maya; en el siglo XII, el colapso de la cultura Tiahuanaco, debido a extensas sequías en el altiplano peruano-boliviano; luego, entre los siglos XIV a XVI, las excesivas lluvias de los monzones que llevaron al colapso de la cultura Angkor, en el sudeste asiático.

El último gran enfriamiento o época de glaciación en la tierra tuvo su máximo hace 22,000 años, siendo el período promedio hace 18,000 años y su término se estima aproximadamente hace 12,000 años (Zimmermann, 2017). Es durante ese período que se produce el paso de los pobladores asiáticos hacia Alaska por el Estrecho de Bering trayendo los rasgos físicos y costumbres a nuestro continente.

No podemos dejar de mencionar lo ocurrido en el mundo durante la última Pequeña Edad de Hielo entre los años 1300 y 1850 d.C. (Fagan, 2000) cuando se produce un enfriamiento que altera totalmente la vida en el mundo, especialmente en Europa, donde la temperatura bajó alrededor de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante todo este período, hubo episodios de variación de la temperatura muy significativos, cuyas consecuencias desde los puntos de vista sociales, políticos, económicos, artísticos, literarios, etc., fueron tan grandes que ocasionaron hechos increíbles tales como la cacería de brujas cuando mataron a alrededor de 50,000 ancianas que caminaban por las calles y luego las quemaban. Se estima que la hambruna por la baja producción de alimentos ocasionó la Revolución Francesa, el cambio del tipo de cultivos en Inglaterra y muchos otros disturbios, por lo que el siglo XVII fue denominado “el siglo maldito” (Parker, 2013), y 1816 fue llamado “el año sin verano” (Stommel y Stommel, 1979).

Todo ese historial socioclimático nos hace pensar y suponer que el calentamiento que estamos viviendo actualmente va a traer consecuencias muy graves en la sociedad mundial. Considerando que reducir la magnitud del calentamiento será una tarea sumamente difícil, dadas las condiciones y la problemática sociológica, es conveniente entonces adoptar medidas de adaptación como siempre lo ha hecho la especie humana para disminuir el sufrimiento que inevitablemente se presentará a medida que pasan los años y décadas, lo cual viene siendo advertido reiterativamente por el Secretario General de las Naciones Unidas, el Sr. Antonio Guterres.

En la Edad Media (500-1500 d.C.), cuando se produjo la Pequeña Edad de Hielo (1300-1850 d.C.), se cometieron hechos muy dolorosos por desconocimiento de lo que ocurría, ya que la ciencia todavía no lo había explicado. En cambio, actualmente, sí conocemos las causas del calentamiento, cuánto durará, cuáles son y serán sus consecuencias y qué nos espera en el futuro cercano, a mediano plazo y en el futuro lejano.

La Situación Actual

Estamos viviendo una época interglaciar desde aproximadamente doce mil años después de la última gran glaciación, y los glaciares -esas masas de hielo y adornos tan bonitos de muchas cordilleras nevadas en el mundo, que en un pasado reciente se denominaban “nieves perpetuas”- han constituido a través del tiempo un elemento importante dentro de la vida de los pueblos, tanto desde el punto de vista de la vida misma, por el aporte hídrico de su derretimiento para todas las actividades vitales y no vitales de los humanos, como porque han servido y sirven como espacios muy apropiados para el turismo de aventura con actividades de caminata y/o de escalamiento de las cumbres nevadas.

Todos los 11 de diciembre (Día Internacional de la Montaña) nos permiten recordar el valor de las montañas en donde se guardan valiosos recursos de flora y fauna, así como reservas de agua dulce, imprescindibles en la época de estío cuando no se cuenta con sistemas de regulación en las cuencas alimentadas por el derretimiento de las masas de hielo. Los habitantes de las montañas glaciadas tienen que encarar desafíos únicos ante los efectos del cambio climático, tanto desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos como de la gestión del riesgo de desastres.

En el Perú, desde hace más de 70 años, se viene enfrentando la amenaza de glaciares y de lagunas peligrosas de origen glaciar mediante el desarrollo de estudios y tecnología cada vez mejorados, lo que ha permitido reducir el riesgo de pérdida de vidas y activos en los asentamientos aguas abajo. De esta manera, desde mediados de la década de 1940, se han venido ejecutando obras de seguridad que en muchos casos han demostrado su efectividad. Los estudios y obras se efectuaron enfocados solamente en la gestión del riesgo de desastres hasta la década de 1990, cuan-

do la ciencia y las poblaciones advirtieron la ocurrencia del calentamiento global, que ya había sido anunciado por el físico-químico sueco Svante August Arrhenius, y fue comprobado en 1958 por las mediciones de la concentración de dióxido de carbono hechas por Charles David Keeling ante la sugerencia del Profesor Roger Revelle, con lo que se demostró por primera vez al mundo la posibilidad de una contribución antropogénica al "efecto invernadero" y al calentamiento global. Sin embargo, recién en los años 1990 se toma conciencia de la inequívoca influencia antropogénica en la elevación de la temperatura ambiental, de acuerdo con el Quinto Informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2014).

La causa de la demora en el conocimiento y la toma de conciencia de tal fenómeno la explican los historiadores científicos Naomi Oreskes y Erik Conway (2010) en su libro *Merchants of doubt*, obra en la cual se identifican similitudes entre el debate sobre el cambio climático y las más recientes controversias sobre el consumo de tabaco, la lluvia ácida y el agujero de ozono. Estos mismos autores han demostrado lo que muchos sospecharon durante mucho tiempo: la negación del calentamiento y la crisis climática y muchos otros problemas ambientales fue elaborada por las mismas personas que hicieron creer en la existencia de cigarrillos seguros.

Hay que tener en cuenta que los glaciares son “hijos del clima”. Crecen cuando hay un enfriamiento en el planeta en las épocas de glaciación, llamadas también eras glaciares, y se derriten en las épocas interglaciares cuando la temperatura se eleva. En el caso de nuestro país, es recién a principios de la década de 1990 que se comienza a detectar y tomar conciencia del acelerado retroceso glaciar (disminución de la longitud de las lenguas glaciares monitoreadas), con las mediciones que se fueron efectuando como parte del monitoreo glaciar, a pesar de que el calentamiento se había intensificado ya desde los años 1970. Concordando con todo lo dicho, justamente, ahora es bien conocido que el retroceso de los glaciares es el indicador más evidente del calentamiento y constituye la señal más clara de la intensificación del cambio climático. Los períodos interglaciares son parte integrante del historial climático de nuestro planeta y, de acuerdo con las investigaciones paleoclimáticas, se conoce que en los últimos 800,000 años se han producido por lo menos 11 episodios, o sea, una combinación de períodos de enfriamiento y calentamiento en forma natural. Actualmente, estamos viviendo el período interglacial que ha continuado al enfriamiento que tuvo en promedio su valor máximo hace 18,000 años.

Razones para Preocuparse y Pensar en las Futuras Generaciones

Un proyecto de investigación liderado por el matemático Safa Motesharri (Motesharri et al., 2014) ha creado un nuevo modelo que entrecruza diversas disciplinas y que se ha bautizado como "dinámicas humanas y naturales" ("human and nature dynamics", HANDY, por sus siglas

en inglés). Tras investigar los factores involucrados en la caída de los imperios y civilizaciones de los últimos 5,000 años, la investigación ha detectado que los principales factores que influyen en el "declive de una civilización y que pueden ayudar a determinar el riesgo actual de colapso son: población, clima, **agua**, agricultura y energía". Efectivamente, el nexo "**agua, energía y alimentos**" se considera el objetivo más importante para los planes de desarrollo futuros. La falta de alimentos, su escasez o altos precios pueden originar el colapso de la humanidad por el año 2040, ya que se está produciendo una muy alta demanda por alimentos y los factores para ello son el cambio climático, el estrés hídrico, el proceso de globalización y la creciente inestabilidad política mundial (Ahmed, 2015).

Una variedad de registros naturales muestra que los últimos 10,000 años han sido un periodo inusualmente estable en la historia del clima de la tierra. Las sociedades humanas modernas se desarrollaron en esta época. Los sistemas económicos, de transporte y de agricultura de los cuales dependemos son vulnerables si el clima cambia significativamente (Fagan, 2004). La vida en la tierra depende del clima, es moldeada por el clima y lo afecta también. El apogeo y el colapso u ocaso de las civilizaciones ha dependido mucho de las condiciones del clima, tal como se ha mencionado en los primeros párrafos.

La Realidad Actual

Actualmente, uno de los mayores impactos está dado por el cambio de los patrones de lluvia, de tal manera que se ha alterado la variabilidad climática que tuvimos presumiblemente durante miles de años. Ese factor desorienta al poblador en general y mayormente a los agricultores que nos proveen del insumo para la seguridad alimentaria. Entonces, esta es la principal razón para el presente ensayo. Se estima que la lucha contra el cambio de clima está dada por la mitigación y la adaptación.

La **mitigación** va hacia las causas del calentamiento, es decir, a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, teniendo en cuenta que, según la Unión Europea, entre 2018 y 2019, los 10 países mayores emisores fueron: China 30.3 %, Estados Unidos 13.4%, Países Europeos 8.7%, India 6.8%, Rusia 4.7%, Japón 3.0%, Irán 1.8%, Corea del Sur 1.7%, Indonesia 1.6%, y Arabia Saudita 1.6%. [Nota del editor: Más recientemente, las cifras para 2022 son: China 30.2 %, Estados Unidos 13.5%, Alemania 1.7%, India 7.3%, Rusia 5.1%, Japón 2.8%, Irán 2.3%, Corea del Sur 1.6%, Indonesia 2.1%, y Arabia Saudita 1.8% (Statista Research Department, 2023).]

Por otro lado, está la **adaptación** ante el cambio climático, lo cual implica que tenemos que acomodarnos a las nuevas condiciones y desafíos que nos plantea actualmente la naturaleza. Dentro de ello, es bien conocido que la disponibilidad de los recursos hídricos ha sido alterada por el cambio climático, ya que mientras la población se duplica, el consumo de agua se cuadruplica debido a

la mayor demanda de una población creciente y también por efectos de los mejores niveles de vida. Pero no solamente tenemos que considerar al agua como el principal elemento afectado por el cambio climático, sino por la tremenda importancia del agua en toda actividad humana, teniendo en cuenta que se estima que el nexo agua-alimentos-energía es vital para la sobrevivencia del género humano. Considerando esas variables, no solamente se trata de proveer una cantidad suficiente de recurso hídrico a la población sino de cautelar su manejo intersectorial, dada la alta competencia por los diferentes usos del agua, ya sea para uso poblacional, producción de alimentos, generación de energía eléctrica, conservación del medio ambiente y otros usos, para lo cual es importante adoptar las políticas necesarias con respecto a la gestión de los recursos hídricos.

Conviene recordar los principios de Dublín promulgados en enero 1992 (https://es.wikipedia.org/wiki/Declaraci%C3%B3n_de_Dubl%C3%ADn), en los cuales se define el agua como "un recurso finito, vulnerable, esencial para la vida, el desarrollo y el medio ambiente", lo que nos recuerda que la cantidad de agua que tenemos en el planeta es la misma desde la época de los dinosaurios y la menor cantidad disponible per cápita actual se debe al incremento de la demanda, ya que se conoce que, mientras la población se duplica, el uso del agua por lo menos se cuadruplica. Dentro de ese contexto, el segundo principio de Dublín referido al cuidado y gestión de los recursos hídricos establece que "el aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de todos los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles".

¿Nos Preocupa la Variación del Clima y Sus Consecuencias?

Creo que todavía no hemos tomado conciencia real de lo que significa un cambio de clima, ya sea enfriamiento o calentamiento, y es por ese motivo que 25 reuniones de la Conferencia de Partes instaurada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) no han arribado a resoluciones y acciones concretas para reducir o, por lo menos, estabilizar la temperatura del medio ambiente terrestre por efectos de la emisión antrópica de los gases de efecto invernadero. El cambio climático (enfriamiento) que ocurrió en nuestro planeta entre 1300 y 1850 ha originado que científicos del clima e historiadores científicos hayan escrito muchos libros referidos a aquella etapa climática de la tierra y solamente los títulos de dos obras nos muestran la severidad y gravedad de las consecuencias que tuvo aquel cambio climático en la vida de las naciones en aquella oportunidad. Parker (*El siglo maldito*, 2013) relata toda la tragedia que vivieron los países europeos y los del resto del mundo durante la ocurrencia de la Pequeña Edad de Hielo cuando se produjo la carencia de alimentos, la hambruna generalizada, las guerras internas y entre países por el desasosiego de la población ante la impotencia de luchar contra el frío, las granizadas, el congelamiento que ocurrieron en aquella oportunidad. Además, relata cómo

se mató y quemó alrededor de 50,000 ancianas en los países europeos acusándolas de ser brujas que con sus malas artes propiciaron aquella calamidad climática. Igualmente, *El motín de la naturaleza* de Philipp Blom (2019) nos relata lo que ocurrió entre los siglos XVI y XVIII, cuando el hemisferio norte sufrió un desplome de la temperatura de dos grados centígrados en promedio; el cambio de las corrientes oceánicas y de la salinidad del mar; veranos con hielo, nieve y granizos; inviernos mortales en América del Norte; y sequías y pérdida de cosechas en China e India, que causaron dramáticas hambrunas.

El conocimiento actual de los fenómenos climáticos, sociales, políticos y económicos sumamente catastróficos de aquella época nos debe inducir a tomar ahora las medidas que sean posibles para disminuir los graves impactos que ocasionará el calentamiento terrestre actual, ahora derivado al cambio climático, y que se viene traduciendo en la desaparición de las masas glaciares, fuente del vital recurso hídrico para todas las actividades humanas.

Y Es Allí a Donde Se Orienta el Objetivo de Este Ensayo

En primer lugar, diremos que la mayor parte de los conflictos ambientales en Perú están referidos al agua directa o indirectamente, y se han dado casos en los que, incluso contando con la suficiente cantidad de recurso hídrico, no se ha logrado una concertación solidaria para su manejo a nivel de cuenca. En el departamento de Ancash, tenemos un ejemplo muy claro de cómo en la subcuenca Lullán-Parón, en la provincia de Huaylas, a pesar de contar con un reservorio para uso múltiple que es el embalse Parón, se ha originado un conflicto que desde el año 2008 hasta la fecha -octubre 2021- no es resuelto ni por la iniciativa del Estado ni por la sociedad civil de la misma subcuenca. Este conflicto se originó por el uso casi exclusivo de las aguas que hacía la hidroeléctrica Cañón del Pato, dado que el Estado les entregó las instalaciones de regulación del embalse y, por lo tanto, la oportunidad y descarga de las aguas obedeció casi exclusivamente a las necesidades de la ciudad central hidroeléctrica. La ausencia de fiscalización tanto en el caudal de descarga como en los horarios de uso sin una adecuada coordinación con los otros usuarios (agua potable de la ciudad de Caraz, agricultura, turismo, etc.) indudablemente demuestra que la falta de gestión fue el detonante para este conflicto. Es evidente que, a pesar de tener un aprovechamiento hídrico útil para los diferentes usos, si no hay coordinación intersectorial o entre todos los usuarios, se germina un problema social que interrumpe el buen funcionamiento del binomio oferta-demanda del recurso hídrico.

Cómo Llevar a Cabo una Gestión de los Recursos Hídricos por Cuenca y Subcuenca

Para la gestión de los recursos hídricos, debemos tener en cuenta en principio la dimensión local y la dimensión global del tema. A nivel global, se encuentra el tema de

los objetivos del desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>), los cuales están íntimamente ligados con el agua tanto en los objetivos (8) de desarrollo del milenio (para el 2015 el elemento fundamental era el agua) y actualmente en los objetivos (17) de desarrollo del milenio para el 2030. En estos últimos objetivos, la gestión en cuencas bajo diferentes enfoques constituye una opción de gestión territorial y ambiental con fines productivos, de conservación del recurso, de elementos naturales y de mejora de la calidad de vida de la población.

Para llevar a cabo la gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca, debemos tomar en cuenta el aspecto social integral y el aspecto legal. El aspecto social integral está dado por el segundo principio de Dublín que a la letra dice: “el aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles”. Para la consecución de este planteamiento, a su vez, se propone la **gestión integrada de los recursos hídricos** (GIRH) que ha sido definida por la Asociación Mundial del Agua como “**un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales**”.

El aspecto legal está dado por la Ley de Recursos Hídricos N.º 29338 (ANA, 2019), que menciona dentro de su amplia normativa, lo siguiente (dos extractos):

Artículo II. - Finalidad

La presente ley tiene por finalidad regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta.

Artículo III. - Principios

Principio 3. Principio de participación de la población y cultura del agua.

El estado crea mecanismos para la participación de los usuarios y de la población organizada en la toma de decisiones que afectan el agua en cuanto a calidad, cantidad, oportunidad u otro atributo del recurso. Fomenta el fortalecimiento institucional y el desarrollo técnico de las organizaciones de usuarios de agua.

Además, citamos otros documentos de la Autoridad Nacional del Agua:

El Decreto Supremo N.º 018-2017-MINAGRI, Reglamento de Organización y Funciones de la Autoridad Nacional del Agua, señala en el Artículo 5.- Funciones Generales, párrafo r) lo siguiente:

r) Promover las acciones necesarias para el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídri-

cos por cuencas hidrográficas, en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos y de la gestión de calidad ambiental nacional, estableciendo alianzas estratégicas con los gobiernos regionales, locales y el conjunto de actores sociales y económicos involucrados.

La Resolución Jefatural N.° 083-2016-ANA estipula que, para el funcionamiento del sistema nacional de gestión de los recursos hídricos, se autoriza la formación de grupos de trabajo o mesas temáticas, cuyas funciones y roles se establecen en las normas de su creación y serán reconocidas por la autoridad administrativa del agua correspondiente.

Igualmente, a nivel regional se tiene la Ordenanza Regional N.° 005-2019-GRA/CR, que menciona lo siguiente:

Artículo Primero. –

Declarar de interés público y prioridad regional la gestión integrada de los recursos hídricos a nivel de subcuencas en la región Ancash, con el liderazgo de los gobiernos locales ubicados en las unidades hidrográficas de las subcuencas a gestionar, con la participación de las instituciones públicas, privadas, sociedad civil y usuarios en general de acuerdo con los lineamientos de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Concordante con todos los dispositivos citados, se ha formado el Comité de Gestión de los Recursos Hídricos de la subcuenca Quillcay como punto de inicio que debe ser luego aplicado en todas las subcuencas de la Región Ancash, lo que a la larga significará el ordenamiento inicial para el funcionamiento de las grandes cuencas principales.

Discusión y Conclusiones

En el informe del 5 de octubre de 2021, “Estado de los servicios climáticos-agua”, la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2021) ha mencionado la existencia actual de brechas muy claras que comprueban que, en asuntos de recursos hídricos, hay muy pocos países en la ruta de tener recursos hídricos gestionados de manera sostenible, a pesar de que la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se considera vital para lograr el bienestar social, económico y ambiental a largo plazo. Igualmente, el 79% de los países asistentes al Acuerdo de París mencionan a la gestión del agua como una de las principales prioridades de adaptación.

Estas recientes declaraciones y publicaciones no hacen más que consolidar lo planteado en este documento, que busca despertar la preocupación de usuarios, líderes y autoridades sobre la importancia de la gestión integrada de los recursos hídricos.

No podemos dejar de incluir los valiosos conceptos que el Ing. Axel Dourojeanni (1998), experto senior de la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), dice con respecto a los desafíos que se presentan

frecuentemente para instaurar procesos y organismos de gestión de cuencas hidrográficas. En principio, está la gran tarea de crear capacidades de gobernabilidad sobre las cuencas y el agua para minimizar los conflictos actuales y futuros, tanto entre usuarios como con el medio ambiente. Por dicho motivo, es necesario disponer de organizaciones y organismos de cuenca que permitan una gobernabilidad efectiva del agua por cuenca. Esta necesidad no es reciente en los países de la región. Sin embargo, en muchas cuencas como en todas las subcuencas de la cuenca del río Santa, así como en el mismo río Santa, no se ha iniciado este proceso tan importante. Crear y consolidar un organismo de cuenca es un desafío grande en países como el Perú, debido a que no hay un pleno convencimiento de su urgente necesidad. Algunos actores sienten que una organización de cuencas es una amenaza para sus intereses, especialmente para los politiqueros baratos, incluso algunas instituciones del Estado ven a la participación como un estorbo a sus decisiones, tal como ocurre en algunas ciudades de nuestro país. En general, hay una negación para otorgar a estos organismos de cuenca autonomía financiera. Hay temor de dar a las organizaciones de cuenca poderes de decisión, y se intenta limitarlas a ser simples sistemas consultivos. Hay temor de la descentralización en general. Hay temor de las autoridades de regiones y municipios, cuyo territorio está parcial o totalmente dentro de una cuenca, de perder autoridad y control.

El objetivo de este ensayo es procurar la participación efectiva del Estado, de la sociedad, de los usuarios de la cuenca y del agua, sobre todo para lograr equidad en la distribución y uso del agua, y diseñar una visión compartida y sustentable de lo que se desea lograr. Al mismo tiempo, se debe promover que se respeten los límites que impone la naturaleza y que exista una autoridad de agua que fiscalice efectivamente el cumplimiento de las decisiones dentro del marco de la ley.

Concluiremos entonces que, solo logrando los objetivos planteados, podremos asegurar que las próximas generaciones puedan disponer de este valioso recurso que es el agua, reiterando el primer principio de la Declaración de Dublín: “...un recurso finito, vulnerable, esencial para la vida, el desarrollo y el medio ambiente”. Siempre lo ha sido y debemos procurar que lo siga siendo en cantidad, calidad y oportunidad.

Referencias

- Ahmed, N. (2015). Scientific model supported by UK government taskforce flags risk of civilisation's collapse by 2040. *Insurge Intelligence* (June 19, 2015). <https://medium.com/insurge-intelligence>
- Blom, P. (2019). *El motín de la naturaleza: Historia de la Pequeña Edad de Hielo (1570-1700), así como el surgimiento del mundo moderno, junto con algunas reflexiones sobre el clima de nuestros días*. Barcelona, Anagrama.
- Dourojeanni, A., Dascal, G. y Salgado, R. (1998). *Guía para la creación de entidades de gestión de cuenca*. Documento de discusión. III Taller de Gerentes de Organismos de Cuenca en América Latina y el Caribe Buenos Aires, 19-20 de noviembre.
- Fagan, B. (2000). *The Little Ice Age: How climate made history, 1300-1850*. New York, Basic Books.
- Fagan, B. (2004). *The long summer: How climate changed civilization*. New York, Basic Books.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri y L. A. Meyer (Eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2019). Ley de los Recursos Hídricos Ley N.º 29338. Lima, Ministerio de Agricultura.
- Motesharrei, S., Rivas, J. y Kalnay, E. (2014). Human nature and dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies. *Ecological Economics*, 101, 90-102.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2021). Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2020. *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero*, 17 (25 de octubre de 2021).
- Oreskes, N. y Conway, E. M. (2010). *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*. New York, Bloomsbury Press.
- Parker, G. (2013). *El siglo maldito: Clima, guerra y catástrofes en el siglo XVII*. Barcelona, Editorial Planeta.
- Statista Research Department. (2023). Ranking mundial de los principales países emisores de gases de efecto invernadero en 2022. Retrieved 17 November 2023 from <https://es.statista.com/estadisticas/711610/ranking-mundial-de-los-principales-paises-emisores-de-gases-de-efecto-invernadero/#:~:text=Esta%20estad%C3%ADstica%20presenta%20un%20ranking,de%20Estados%20Unidos%20e%20India>.
- Stommel, H. y Stommel, E. (1979). The year without a summer. *Scientific American*, 240(6), 176-187.
- Weiss, H. (Ed.). (2017). *Megadrought and collapse: From early agriculture to Angkor*. Oxford University Press.
- Zimmerman, K. A. (2017, August). Pleistocene Epoch: Facts about the Last Ice Age, Live Science Contributor. Retrieved from <https://www.livescience.com/40311-pleistocene-epoch.html>

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CORDILLERA BLANCA (PERÚ): OBSERVACIONES POR SENSORES REMOTOS ENTRE 1987 Y 2020

Climate Change Impact in the Cordillera Blanca (Peru): Observations by Remote Sensing between 1987 and 2020

Walter Silverio¹

¹Investigador independiente (walter_silverio@hotmail.com), Ginebra, Suiza

Resumen

El presente artículo hace una síntesis del impacto del cambio climático en la Cordillera Blanca del Perú. Estos impactos se dan en tres ejes:

1) Retroceso glaciar: En 1970, la Cordillera Blanca y sus satélites Rosco y Pelagatos cubrían una superficie glaciar de 723.4 km² y, en 2016, solamente 449.2 km². En 46 años perdieron 274.2 km² de cobertura glaciar (38%), con un retroceso promedio de 6 km²/año. El fenómeno ocurre principalmente entre 4500 y 5500 m de altitud. En 2014, Rosco desapareció por completo y, en 2016, Pelagatos solo contaba con una superficie glaciar de 0.2 km². Si el retroceso glaciar persiste, a mediano y largo plazo, la disponibilidad hídrica de la región está amenazada.

2) Aparición de nuevas lagunas, desarrollo, disminución de volumen de lagunas y desaparición: Los glaciares al retirarse, dejan espacios para que nuevas lagunas aparezcan o se desarrollen las ya existentes. Asimismo, dejan inestable las morrenas laterales de las lagunas y estas en tiempos de lluvia se saturan de agua y producen deslizamientos o derrumbes sobre las lagunas, lo cual produce los desbordes (aluviones) que afectan la región. En los últimos años, las morrenas han producido aluviones o desbordes (GLOF: Glacier Lake Outburst Flood).

En 2016, existían 882 lagunas, la mayoría de ellas ubicadas en sitios remotos y de difícil acceso. En tiempo de lluvias, estas pueden producir los GLOF, por lo tanto, se hace necesario un monitoreo permanente vía la teledetección satelital. Por ejemplo, una consulta virtual semanal usando Google Earth puede ser de gran utilidad para la prevención de desastres.

3) Evolución de los DCG (fragmentación y conversión de los DCG en lagunas): El retroceso glaciar implica igualmente la falta de aporte a los DCG (Debris-Covered Glaciers). La mayoría de ellos se está "secando" y por ello se están contractando y desintegrando. Dos DCG se han convertido en lagunas, uno en la quebrada Ulta, y el otro, en la quebrada Cojup, conocido como laguna Palcacocha. Este último, es una preocupación constante para la UGRH (ANA) y el INAIGEM quienes lo monitorean. Los otros 16 DCG se están fragmentando y presentan charcos de agua en su interior, lo que significa que van a necesitar un monitoreo sistemático y continuo.

Los sensores remotos, acoplados a los SIG, son herramientas indispensables para el monitoreo de glaciares, de lagunas y de los DCG. Las imágenes satelitales dan cuenta del estado temporal de esos tres elementos de la cordillera e incluso de la cobertura de suelos y de la actividad humana.

Palabras clave: Cambio climático, sensores remotos, Cordillera Blanca, Perú

Abstract

This article summarizes the climate change impact in the Cordillera Blanca of Peru. These impacts occur in three axes:

1) Glacial retreat: In 1970, the Cordillera Blanca, and its satellites Rosco and Pelagatos covered a glacier surface of 723.4 km² and in 2016, only 449.2 km². In 46 years, they lost 274.2 km² of glacial coverage (38%), with an average retreat of 6 km²/year. The phenomenon occurs mainly between 4500 and 5500 m altitude. By 2014, Rosco had completely disappeared and, in 2016, Pelagatos only had a glacier surface of 0.2 km². If glacial retreat persists, in the medium and long term, the region's water availability is threatened.

2) Appearance of new lakes, development, decrease in volume of lakes and disappearance: When glaciers retreat, they leave spaces for new lakes to appear or existing ones to develop. Likewise, they leave the lateral moraines of the lagoons unstable and, in times of rain, these become saturated with water and produce rockfalls or landslides onto the lakes, which in turn produce overflows that affect the region. In recent years, moraines have produced floods (GLOF: Glacier Lake Outburst Floods).

In 2016, there were 882 lakes, most of them located in remote and difficult to access places. In rainy weather, these can produce GLOFs. Therefore, permanent monitoring via satellite remote sensing is necessary. For example, a weekly virtual consultation using Google Earth can be very useful for the prevention of disasters.

3) Evolution of the DCGs (fragmentation and conversion of DCGs into lakes): glacier retreat also implies the lack of contribution to the DCGs (Debris-Covered Glaciers). Most of them are "drying out" and are therefore contracting and disintegrating. Two DCGs have become lakes, one in the Ulta ravine, and the other in the Cojup ravine, known as Lake Palcacocha. The latter is a constant concern for the UGRH (ANA) and INAIGEM who monitor it. The remaining 16 DCGs are fragmenting and have pools of water inside, which means that they will require systematic and continuous monitoring.

Remote sensing, coupled with GIS, are essential tools for monitoring glaciers, lakes and DCGs. Satellite images show the temporal state of these three elements of the cordillera and even the soil cover and human activity.

Keywords: Climate change, remote sensing, Cordillera Blanca, Peru

Introducción

En el Perú, el cambio climático está produciendo un retroceso glaciar acelerado en todas las cordilleras nevadas del país (Silverio, 2017; Silverio y Jaquet, 2014). En la Cordillera Blanca, este fenómeno no afecta solamente a los glaciares sino también a los glaciares cubiertos (Debris-Covered Glacier; DCG: por sus siglas en inglés) (Silverio y Jaquet, 2017). Además, el cambio climático afecta también a las lagunas del macizo (formación de nuevas lagunas, crecimiento de algunas lagunas, desborde de lagunas, etc.).

En 1970, la Cordillera Blanca representaba el 35% de la cobertura glaciar del Perú. Sin embargo, el documento del primer inventario de glaciares no da cuenta del número de DCG ni de la superficie que estos ocupaban (Ames et al., 1988). En este primer inventario, los DCG y los glaciares "libres" no fueron diferenciados (A. Ames, comunicación personal). Según Kaser y Osmaston (2002), las cifras de 1970, representaban el 71.24% de los glaciares tropicales.

Según el segundo inventario del 2003, el macizo de la Cordillera Blanca representaba cerca del 40% de la cobertura glaciar del país (UGRH, 2013; 2010a). El número de DCG fue 19, con una superficie total estimada de 11 km² (UGRH, 2010a). El inventario ejecutado por INAIGEM para el año 2016, indica la superficie total de los DCG (22.97 km²), pero no indica el número de ellos (INAIGEM, 2018).

Los glaciares de la Cordillera Blanca representan el reservorio más grande de agua dulce para la región (Silverio y Jaquet, 2005). En 2005, más de 1.5 millones de vidas dependían de este recurso (Silverio, 2007). Igualmente, las aguas de la Cordillera Blanca son captadas para irrigar la costa desértica de Ancash y La Libertad (Silverio y Jaquet, 2017). En la región de Ancash está el proyecto de irrigación CHINECAS, que proyectaba incluir los valles de Chimbote, Nepeña, Casma y Sechín. En la región de La Libertad está el proyecto de irrigación CHAVIMOCHE, que incluye los valles de Chao, Virú, Moche y, eventualmente, Chicama. Las aguas son utilizadas para irrigar las nuevas tierras agrícolas, generar electricidad y proporcionar agua potable para la ciudad de Trujillo (500,000 habitantes en 2005) (Silverio, 2007; Bury et al., 2013; Kaser et al., 2003).

La criósfera (nieve, hielo de ríos y lagos, hielo marino, glaciares, casquetes de hielo, plataformas de hielo, capas de hielo y suelo congelado) refleja las variaciones climáticas en una amplia gama de escalas de tiempo, lo que la convierte en un registro natural de la variabilidad climática que proporciona una expresión visible del cambio climático. Las recientes disminuciones en la masa de hielo se han correlacionado con el aumento de la temperatura del aire en la superficie (Vaughan et al., 2013). Las imágenes de satélite son una fuente importante de información para mapear la evolución de la cobertura de glaciares debido a su repetitividad, su carácter sinóptico

y su fácil integración en los sistemas de información geográfica (Paul, 2003; Silverio, 2007). En este contexto, varias investigaciones han utilizado los sensores remotos para cartografiar la cobertura glaciar en la Cordillera Blanca (ver Silverio y Jaquet 2005, 2017; Silverio, 2007; Racoviteanu et al., 2008; Burns y Nolin, 2014; UGRH, 2010a; INAIGEM, 2018)

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- 1) presentar la evolución de la cobertura glaciar entre 1987 y 2016,
- 2) presentar la evolución de lagunas, y
- 3) monitorear los DCG entre 1987 y 2020.

Cordillera Blanca: Ubicación y Aspectos Generales

La Cordillera Blanca está ubicada, entre las coordenadas geográficas 08° 30' - 10° 10' Sur y 77° 00' - 78° 00' Oeste en el departamento de Ancash, a 400 km norte de Lima. Las dimensiones del macizo son, aproximadamente, 180 km de largo y 30 km de ancho (Silverio y Jaquet, 2005) (Figura 1). En 1975, los 3400 km² (340,000 ha) de la Cordillera Blanca fueron declarados Parque Nacional Huascarán (PNH), que más tarde fue reconocido por la UNESCO como la "Reserva de Biósfera" y "Patrimonio Natural de la Humanidad" (Silverio, 2003; PNH, 1990).

La Cordillera Blanca incluye más de 200 cumbres con altitudes superiores a 5000 m, de los cuales 27 superan los 6000 m; entre ellos está el Huascarán Sur (6768 m), punto culminante del Perú. El macizo cuenta igualmente con numerosas lagunas y quebradas de origen glaciar (Silverio y Jaquet, 2005; Silverio, 2003).

El clima de la Cordillera Blanca se caracteriza por la alternancia de dos estaciones, una seca y la otra húmeda, una fuerte amplitud térmica diaria y una variación relativamente baja inter-estaciones de la temperatura (Kaser et al. 1990, 1996; Kaser y Osmaston, 2002; Silverio, 2003). En la región, no se tiene mucha información sobre la temperatura; sin embargo, las observaciones hechas en la estación climática de Querococha (4050 m s.n.m.) muestran la poca variación durante el año de la temperatura mínima y máxima (Figura 2A).

En cuanto a la precipitación, la estación húmeda va entre octubre y abril, y la seca va entre mayo y setiembre (Kaser et al., 1990). La precipitación máxima cae entre febrero y marzo (Figura 2B). En la década de 1980, durante el verano andino (junio-agosto), el clima seco reinaba en la Cordillera Blanca, salvo un corto período de mal tiempo que duró casi tres días, localmente llamado "cambio de luna". Durante este corto episodio, podía nevar a altitudes superiores de 4500 m s.n.m. (Silverio y Jaquet, 2017). Sin embargo, la nieve podía derretirse en un par de días. El verano andino estaba caracterizado por un tiempo seco, ideal para las ascensiones, pero en los años 2013 y 2014, algunos días fue nublado y nevó a altitudes superiores de 4200 m y llovió e hizo frío alrededor de los 4000 m.

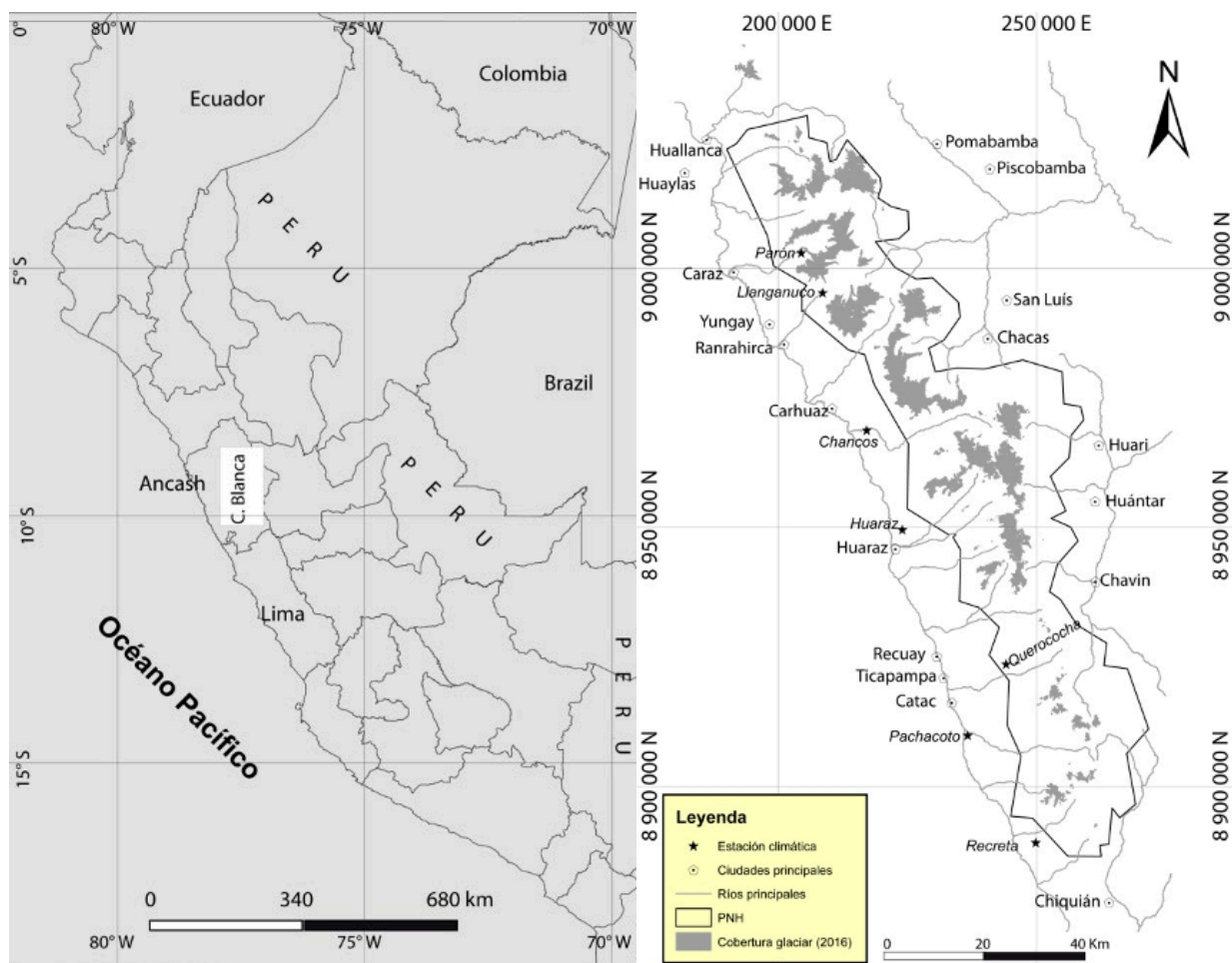
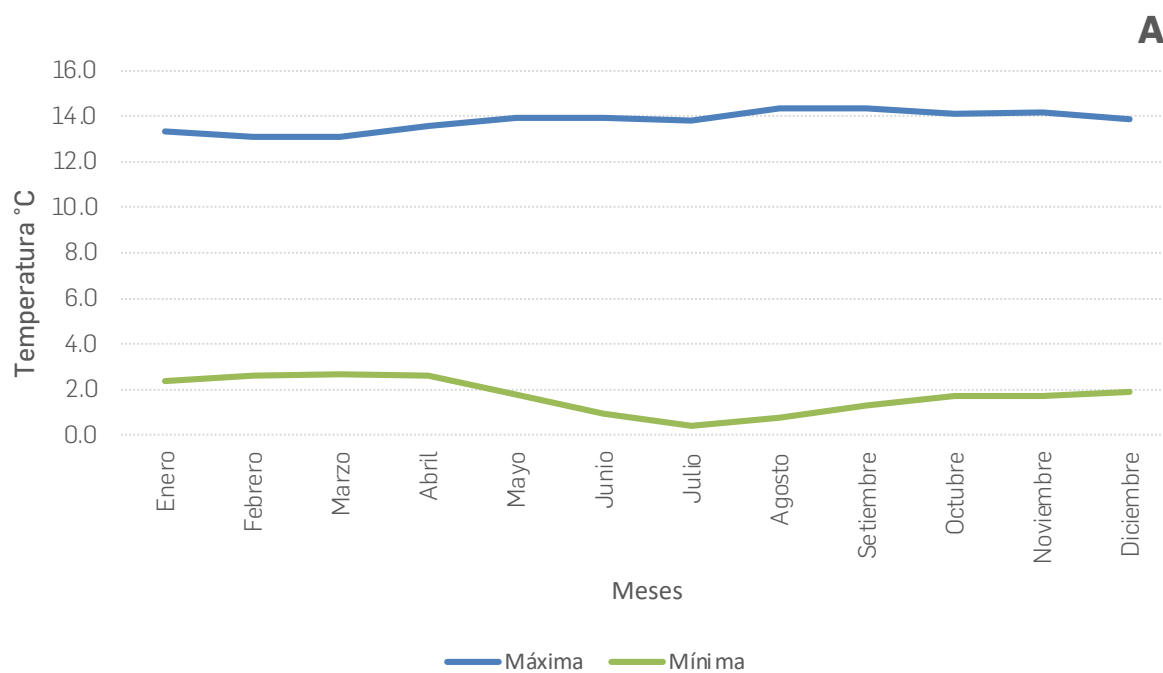


Figura 1. Ubicación geográfica de la Cordillera Blanca a nivel de Perú (izquierda) y el mapa de la Cordillera Blanca con la cobertura glaciaria de 2016 (derecha).



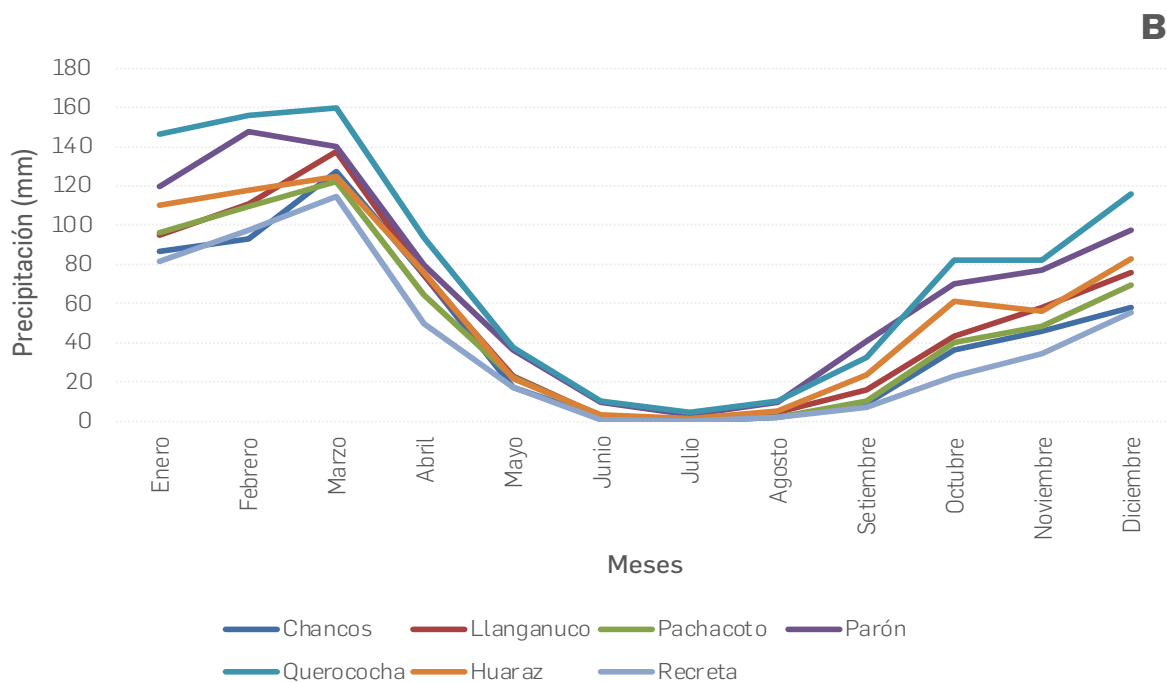


Figura 2. A) Temperaturas mínima y máxima durante el año en la Cordillera Blanca, adaptado de Silverio y Jaquet (2017); B) Precipitación en la Cordillera Blanca, adaptado de Silverio y Jaquet (2017).

Impactos del Cambio Climático

¿Pero de qué manera se manifiesta el cambio climático en la Cordillera Blanca y cuáles son sus efectos? Los glaciares de la Cordillera Blanca son afectados principalmente por los episodios del ENSO. Esto se refleja en la fluctuación de la superficie glaciar del macizo entre 1987 y 2016 (Figura 3). Todo depende de la intensidad y amplitud de los episodios de El Niño (la fase caliente) y La Niña (la fase fría) del ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Silverio y Jaquet, 2017). Según Vuille et al. (2008), el ENSO tiene un impacto en la temperatura y precipitación en los Andes tropicales y sub-tropicales. Estas perturbaciones hidroclimáticas controlan el balance de masa de los glaciares andinos (Francou et al., 1997).

En la Cordillera Blanca, La Niña está asociada con temperaturas más bajas de lo normal. Por otro lado, los episodios de El Niño están asociados por el incremento de la temperatura del aire. Sin embargo, esto depende de la magnitud del evento (Silverio y Jaquet, 2017). Por ejemplo, en la estación climática de Querococha (4050 m s.n.m.) durante un episodio de El Niño, la temperatura media subió entre 0.2 y 0.6 °C (Silverio, 2007), causando que la línea de equilibrio de los glaciares suba entre 150 y 300 m (Francou et al., 1997). En esas condiciones, llueve en las zonas de ablación y así acelera el retroceso glaciar (Silverio y Jaquet, 2017).

Las observaciones glaciológicas de Maussion et al. (2015) en el glaciar de Shallap a 4750 m de altitud indican un déficit de precipitación durante los años de El Niño y un exceso durante La Niña. Igualmente, los autores han demostrado la fuerte influencia del ENSO en altitudes

bajas y menos detectables en altitudes más elevadas.

El impacto del cambio climático en la Cordillera Blanca se da en tres ejes:

- 1) retroceso glaciar (superficie glaciar en disminución),
- 2) desarrollo, aparición de nuevas y desaparición de lagunas glaciares y,
- 3) fragmentación de los glaciares cubiertos (DCG) y su transformación en lagunas.

Retroceso Glaciar

El primer inventario de glaciares de la Cordillera Blanca utilizó fotos aéreas de 1962 y 1970 (Ames et al., 1988). Silverio (2003) y Silverio y Jaquet (2005) fueron los primeros a poner en evidencia el retroceso glaciar de la Cordillera Blanca visibles desde los satélites. Estos trabajos fueron los pioneros de la cartografía glaciar mediante las imágenes satelitales. Para tal efecto utilizaron y popularizaron el método de "Normalized Difference Snow Index" (NDSI) (Dozier, 1989). Después se desarrollaron otros trabajos por Racoviteanu et al. (2008), la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH, 2010a), Burns y Nolin (2014) y el INAIGEM (2018). Claramente, la Cordillera Blanca es la cordillera más estudiada del país y, a nivel nacional, está considerada como la primera reserva hídrica del Perú.

En los trabajos posteriores, Silverio y Jaquet han aplicado otro método más sencillo para cartografiar los glaciares en la Cordillera Blanca: la división entre bandas B4/B5, comúnmente denominado "ratio bandas" del captor TM,

ETM+, OLI5/OLI6 del satélite Landsat. Igualmente, se han aplicado los dos métodos (NDSI y "ratio bandas") para ver la diferencia en los resultados (Silverio y Jaquet, 2017). La diferencia obtenida diverge en solo 2% (Albert, 2002; Silverio y Jaquet, 2017).

Los resultados obtenidos por diversos autores sobre la cobertura glaciar de la Cordillera Blanca son resumidos en la Tabla 1. Claro, los resultados divergen algo de un autor a otro, pues los métodos de trabajo son diferentes.

Las cordilleras Rosco y Pelagatos son macizos independientes de la Cordillera Blanca (Silverio y Jaquet, 2005). Se puede decir que son sus satélites. Sin embargo, como son macizos pequeños y por cuestiones de comodidad han sido incluidos en la Cordillera Blanca (A. Ames, comunicación personal).

Las cartografías realizadas para la Cordillera Blanca para los años 1987, 1996, 2002, 2010 2014 y 2016 muestran un retroceso acelerado del macizo (Figura 3). Este fenómeno ocurre principalmente entre 4500 y 5500 m de altitud (Silverio y Jaquet, 2017).

Tabla 1. Superficie glaciar y de los DCG y el número de DCG obtenidos por diversos autores para la Cordillera Blanca entre 1930 y 2016.

Año	Área total CB (km ²)	Número de glaciares	Número de DCG	Área DCG (km ²)	Fuente
1930	800-850				Georges (2004)
1970	660-680				Georges (2004, 2005)
1970	723.30	722			Ames et al. (1988)
1970 ^a	665.10				Racoviteanu et al. (2008)
1987 ^b	625		18	18	Silverio y Jaquet (2005)
1987	644				Burns y Nolin (2014)
1987	618		18	19.8	Silverio y Jaquet (2017)
1990	620.00				Georges (2004, 2005)
1996 ^b	582		18	18	Silverio y Jaquet (2005)
1996	568		18	18.4	Silverio y Jaquet (2017)
2002	599		18	17.5	Silverio y Jaquet (2017)
2003	569.60		57?	14.9	Racoviteanu et al. (2008)
2003	527.62	755	19	11	ANA-UGRH (2010a)
2004	569				Burns y Nolin (2014)
2010	482				Burns y Noli (2014)
2010	488		16	17-4	Silverio y Jaquet (2017)
2014	494		16	16.8	Silverio y Jaquet (2017)
2016	449		16	16.4	Silverio y Jaquet (2017)
2016	448.81		?	22.97	INAIGEM (2018)

^a Reanálisis de la carta de IGN; ^b no incluye Rosco y Pelagatos.

Lo mismo ha sucedido con Rosco y Pelagatos que, debido a sus posiciones geográficas al extremo norte de la región Ancash, han sido más expuestos a los ataques de El Niño. En la Tabla 2 resumimos la evolución de Rosco y Pelagatos. En el año 2014, Rosco contaba con apenas 1800 m² (2 pixeles) de cobertura glaciar, y en 2016 había desaparecido por completo. Para este último año, Pelagatos tenía una cobertura glaciar de apenas 0.2 km² (Tabla 2; Silverio, 2019).

Silverio y Jaquet (2017) han considerado 3 pixeles (2700 m²) como tamaño mínimo del cuerpo glaciar, lo que puede explicar la diferencia con los resultados de 2005 y de otros autores. Sin embargo, con el margen de error presentado por los autores, sus resultados se encuentran dentro del rango de los otros autores.

Las fotos de campo del glaciar Pastoruri entre 2000 y 2016 pueden resumir el impacto del cambio climático en los glaciares de la Cordillera Blanca (Figura 4A - ABCD).

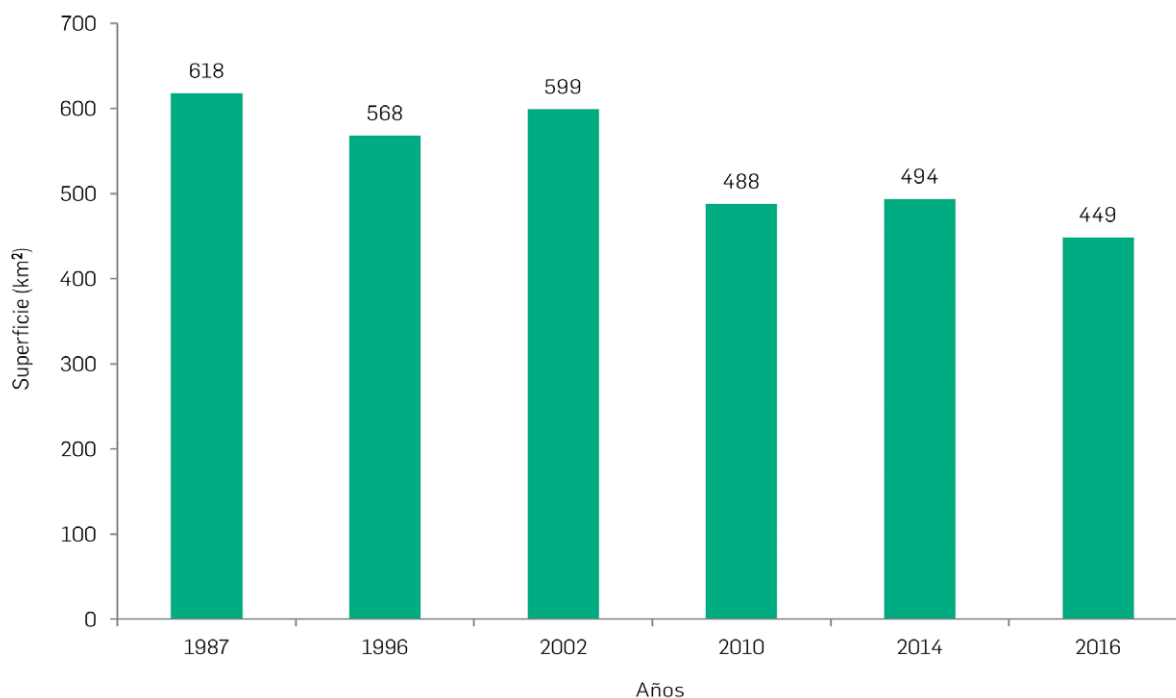


Figura 3. Evolución de la cobertura glaciar de la Cordillera Blanca entre 1987 y 2016, según Silverio y Jaquet (2017).

Esto es claramente visible desde los satélites Landsat (Figura 4B). Otro ejemplo es el retroceso del frente glaciar de Shallap entre 1987 y 2016 observados igualmente desde el satélite Landsat (Figura 5).

Según NOAA (2016), entre 1970 y 2016 varios ENSO han tenido lugar en los Andes. Como lo indican varios autores, los ENSO controlan el régimen de los glaciares andinos (ver Francou et al., 1997; Vuille, et al., 2008; Silverio y Jaquet, 2017), lo que corrobora con la fluctuación de la cobertura glaciar de la Cordillera Blanca indicado en la Figura 3, entre 1987 y 2016.

A los Niños de 1982/1983, 1991/1992 y 1997/1998, le siguió la Niña 1998/2001. Kaser et al. (2003) han reportado

el avance de las lenguas glaciares en la Cordillera Blanca que tuvo su inicio en 2001, lo que indica una ganancia de cobertura glaciar para el 2002 con respecto al año 1996. Sin embargo, este avance fue interrumpido por el Niño 2002/2003, y el resultado fue una pérdida de más de 100 km² de cobertura glaciar entre 2002 y 2010. En seguida se manifestó la Niña 2010/2012 con el cual la superficie glaciar se recuperó un poco para el año 2014. Pero vino nuevamente el Niño 2015/2016, con el cual la pequeña recuperación de 2014 fue en vano.

Por otro lado, Silverio y Jaquet (2017) han demostrado que un aumento en la cobertura glaciar significa la predominancia de La Niña y una disminución sucede cuando el episodio de El Niño es dominante.

Tabla 2. Evolución de la superficie glaciar para las cordilleras Blanca, Pelagatos y Rosco entre 1970 y 2016.

Año	C. Blanca (km²)	Pelagatos (km²)	Rosco (km²)	Total (km²)	Fuente
1970	721	1.56	0.53	723.37	Ames et al. (1988)
1987	618	1.60 ^d	0.50 ^d	620.10	Silverio y Jaquet (2017) ^e
1996	568	1.10 ^d	0.14 ^d	569.24	Silverio y Jaquet (2017) ^e
2002	599	1.40 ^e	0.10 ^e	600.50	Silverio y Jaquet (2017) ^e
2010	488	0.50 ^d	0.01 ^d	488.51	Silverio y Jaquet (2017) ^e
2014	494	0.60 ^d	/	494.60	Silverio y Jaquet (2017) ^e
2016	449	0.20 ^d	/	449.20	Silverio y Jaquet (2017) ^e

^dResultados sólo para la Cordillera Blanca; ^dsegún Silverio (2019); ^eeste estudio.

Aquí solo indicamos los ENSO (Niño/Niña) muy fuertes. Los interesados por este fenómeno pueden visitar el portal de la NOAA, donde encontrarán amplia información al respecto. El análisis del ENSO en la Cordillera Blanca es muy limitado debido a la falta de datos climáticos continuos. Los problemas políticos y la privatización de la central hidroeléctrica del Cañón del Pato (por EGENOR) no han permitido la compilación perenne de los datos en las estaciones climáticas que hubieran permitido el mejor conocimiento del impacto del ENSO en esta región.

Lagunas: Desarrollo, Aparición de Nuevas, Disminución de Volumen y Desaparición

El retroceso glaciar implica el desarrollo de lagunas (Ames, 1998; Klimeš et al., 2016), o la aparición de nuevas lagunas y, en algunos casos, la desaparición de estas. Cuando los glaciares se retiran dejan espacio para que nuevas lagunas aparezcan o se desarrollen las ya existentes. En la Cordillera Blanca, en la década de 1950 había 230 lagunas; en la década de 1970, 267 lagunas y en los últimos años se han detectado 2370 lagunas de diferentes dimensiones (Emmer et al., 2016).



Figura 4A. Evolución de Pastoruri entre 2000 y 2016, según Silverio y Jaquet (2017).

La disminución de la cobertura glaciar (Figuras 3, 4 y 5) significa un menor aporte en agua para las lagunas y, en consecuencia, los volúmenes de las lagunas disminuyen (Figura 6A) y en otros casos, desaparecieron (Figura 6B).

En el año 2002, mediante las imágenes satelitales se detectaron 884 lagunas de diferentes dimensiones (Silverio, 2007). El inventario realizado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos para el 2003 había encontrado 1902 "cuerpos de agua" (lagunas, lagunillas y charcos de agua), de los cuales 830 tenían superficies superiores a 5000 m² y fueron definidos como lagunas. Los otros 1072 "cuerpos de agua" fueron descartadas por presentar superficies menores a 5000 m² (UGRH, 2010b).

Emmer et al. (2016) reportan la existencia de 882 lagunas en la Cordillera Blanca. Eso indicaría que las imágenes satelitales son herramientas de gran utilidad para la detección de lagunas, pues las cifras avanzadas para el año 2002 (Silverio, 2007) encajan con los resultados actuales. Entre los años 2002 y 2016, dos lagunas han desaparecido: la primera ubicada en la quebrada Aritzon (quebrada Santa Cruz; Figura 7) y la segunda, al pie del glaciar entre Huandoy Este y Pisco, por el lado de la

quebrada Llanganuco (Figura 6B), quedando así 882 lagunas para el año 2016.

En la zona norte de la Cordillera Blanca, Safuna Alta, Arhuaycocha y Lagunitas 1, 2 y 3 han sido monitoreadas entre 1975 y 2000 (Silverio y Jaquet, 2003). En la Tabla 3, resumimos la evolución de esas lagunas durante el período indicado. Además, presentamos el desarrollo de Palcacocha entre 1987 y 2010 (Tabla 3). Sobre Palcacocha ver la sección 3.3.1 - 16.

Según la carta de Electroperú (1974) "Mapa índice de lagunas de la Cordillera Blanca", las lagunillas ubicadas en la quebrada Artizon aparecen sin nombre y son inventariadas como "2 lagunitas". Cabe resaltar que la carta de 1974 fue realizada a partir de fotos aéreas de 1962 (Silverio y Jaquet, 2003), lo que explicaría por qué Lagunita 3 aún no aparece en la carta de Electroperú de 1974. La Figura 7 muestra el desarrollo de las lagunas mencionadas entre 1975 y 2000 (Figura 7).

La Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos menciona que, en marzo de 1997, se produce la rotura del dique morrénico frontal de la laguna Artizon, ubicada en la

Tabla 3. Desarrollo de las lagunas Safuna Alta, Ahuaycocha y Lagunitas 1, 2 y 3 entre 1975 y 2000 (Silverio y Jaquet, 2003) y la evolución de Palcacocha entre 1987 y 2010 (este estudio).

Año	Safuna Alta (ha)	Ahuaycocha (ha)	Lagunitas (ha)			Palcacocha (ha)
			1	2	3	
1975	7.4	2	1.1	2.1	0.8	/
1987	14.6	2.8	1.6	1.7	5.2	6
1996	32.8	24.1	1.4	1.7	9.7	8
2000	37.8	33.6	?	3.2	13	/
2002	/	/	/	/	/	20
2010	/	/	/	/	/	47

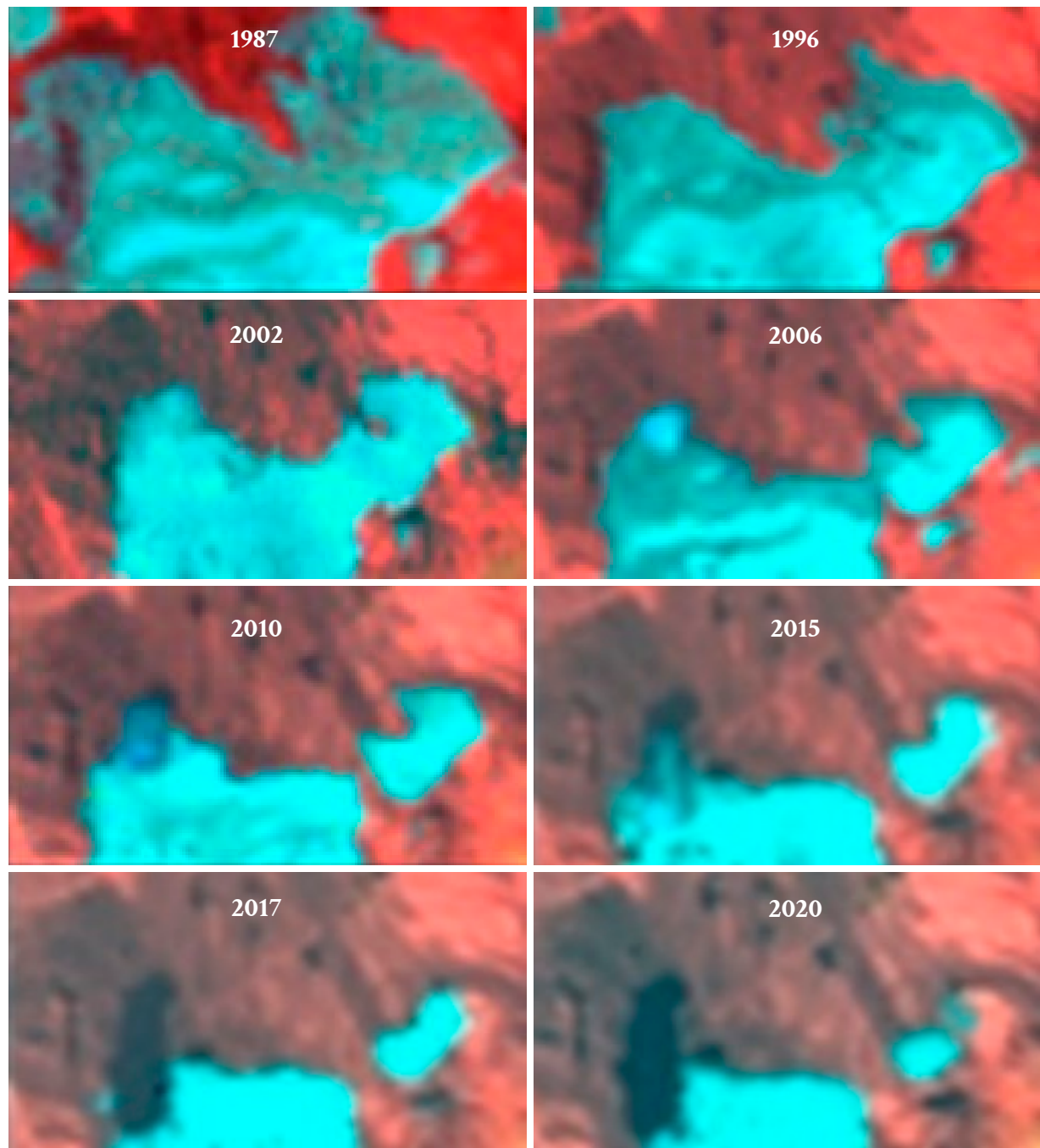


Figura 4B. Evolución de Pastoruri entre 1987 y 2020, monitoreado por sensores remotos. Modificado y completado de Silverio (2019).

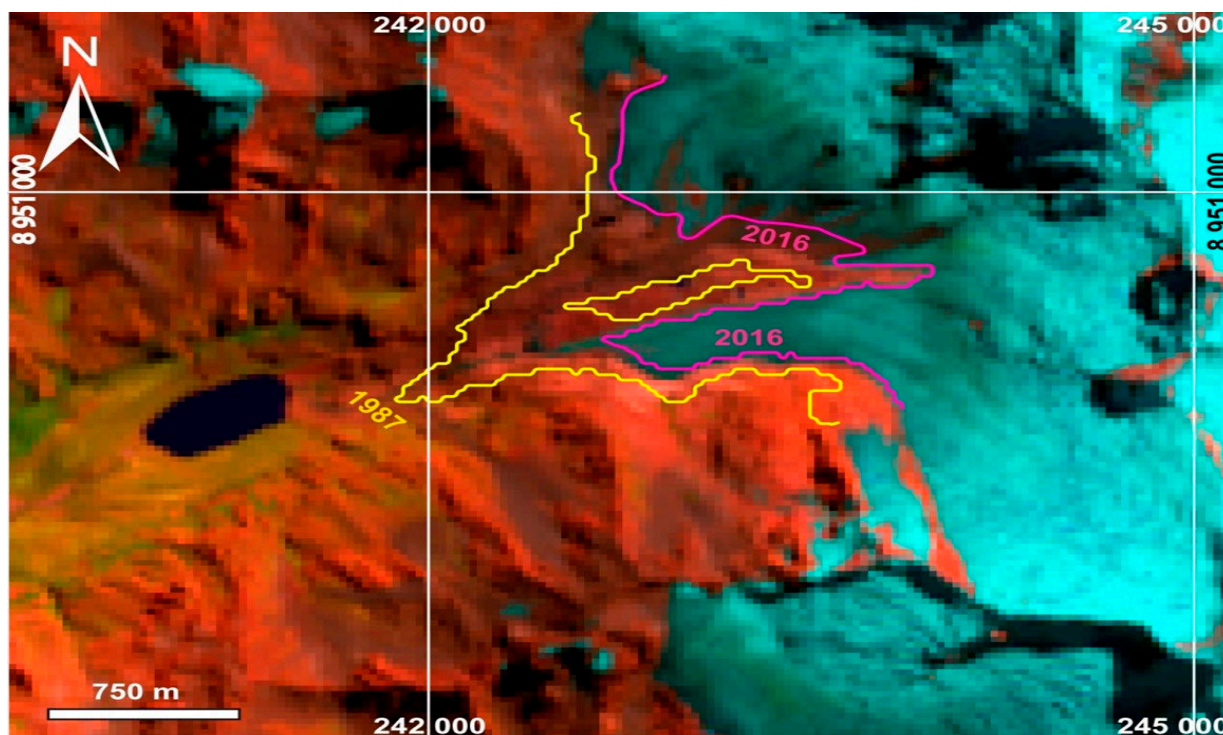


Figura 5. Evolución del frente glaciar de Shallap entre 1987 (contorno amarillo) y 2016 (contorno fucsia). Fondo de carta de Landsat 8 OLI 30.5.2016 (Rojo Verde Azul: 6/4/2).

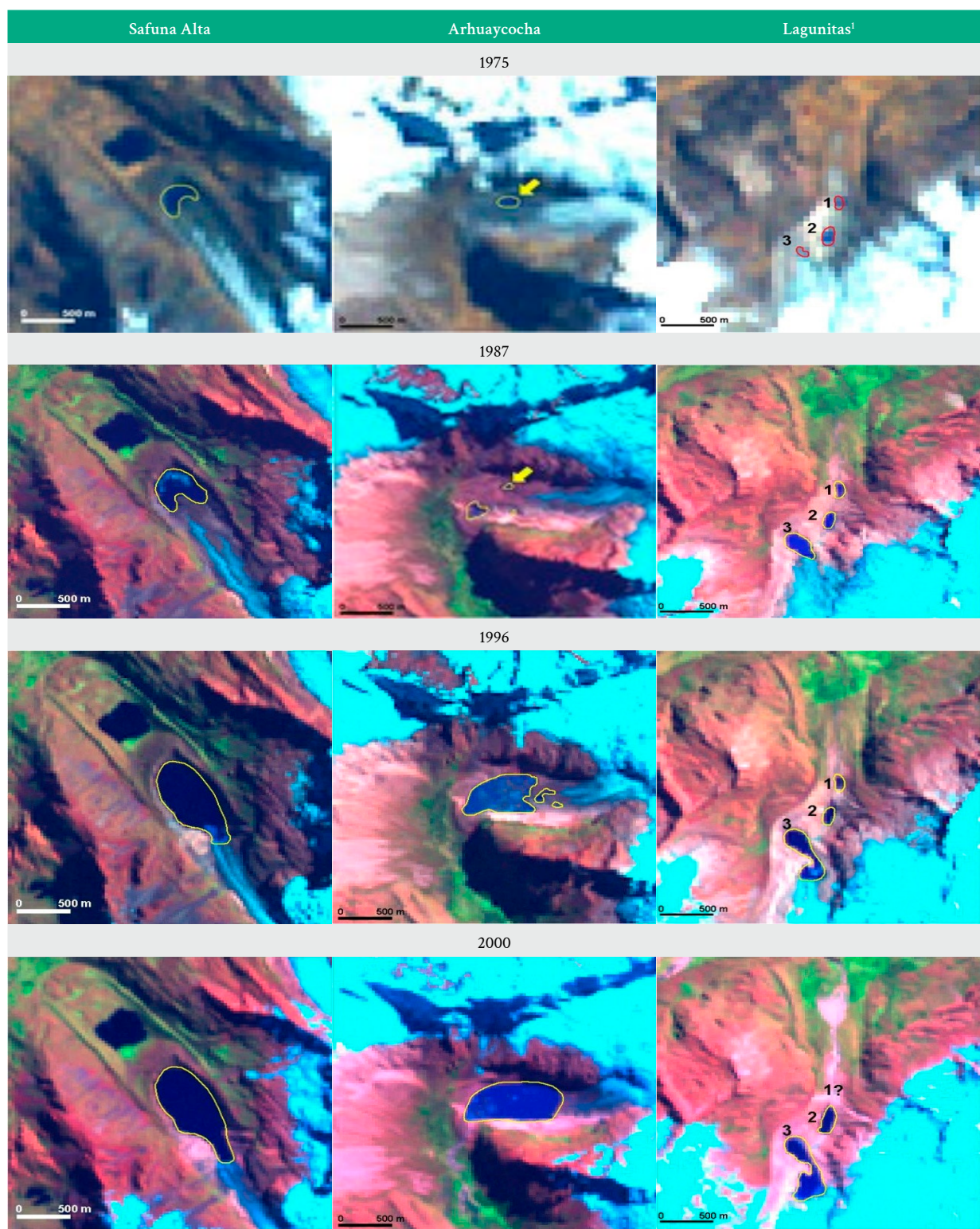
quebrada Santa Cruz, como consecuencia del derrumbe de la pared lateral derecha, próximo al área frontal (UGRH, 2011). A esa fecha, en la quebrada Artizon, ya existían tres lagunas. La Laguna 1 produjo el aluvión. Según las imágenes de Landsat 7 ETM+ del 26 de mayo del 2000, la superficie del depósito fue aproximadamente $0.91 \times 10^6 \text{ m}^2$; en 1999, el espesor del material depositado variaba entre 0.20 y 0.50 m. Eso indica que el volumen promedio fue $0.32 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Silverio y Jaquet, 2003). No se conocen los daños materiales y humanas que provocó el evento (Figura 8). La imagen satelital del 2000 (Figura 8A) de la zona del evento de 1997 muestra que la Lagunita 1 ha desaparecido por completo y el material del derrumbe de 1997 lo ha desplazado (Figura 8B), quedando solo Lagunita 2 y Lagunita 3 (Figura 9). Ahora estas lagunas

son denominadas como Artizon Bajo y Artizon Alto, respectivamente.

Los fenómenos como el de 1997 son denominados GLOFs (Glacier Lake Outburst Floods) por los glaciólogos. En la Cordillera Blanca han ocurrido varios fenómenos de ese tipo y algunos de ellos han sido estudiados por Emmer et al. (2014 y 2016) y Hubbard et al. (2005). Mientras que el retroceso glaciar se aceleraba en la Cordillera Blanca, algunas lagunas, como Lagunita 3, han continuado decreciendo (Figuras 7 y 9; Tabla 3). En 2003, la Lagunita 2 (Artizon Bajo) y Lagunita 3 (Artizon Alto) parecían lagunas pasivas que no representaban ninguna amenaza para la región (Figura 10). Para ese año, Lagunita 3 aún estaba en contacto con el glaciar (Figura



Figura 6. (Izquierda) Disminución de volumen de Laguna 69; (Derecha) Desaparición de una lagunitilla ubicada al pie de los nevados Huandoy Este y Pisco. Adaptado de Silverio (2007).



¹En 1974, estas lagunas aparecen con el nombre de "2 lagunitas". Por esta razón, los autores las bautizaron con el nombre de "Lagunitas 1, 2 y 3".

Figura 7. Desarrollo de las lagunas Safuna Alta, Arhuaycocha y Lagunitas 1, 2 y 3, entre 1975 y 2000. Adaptado de Silverio y Jaquet (2003).

10B). En 2010, parece que el contacto ha desaparecido (Figura 9). La imagen correspondiente al año 2016 de la Figura 9 muestra claramente que los dos cuerpos (glaciar y Lagunita 3) se han separado. Sin embargo, en la imagen de 2013 de la misma figura podemos notar la presencia de nieve temporal. En la Cordillera Blanca son frecuentes los episodios de "mal tiempo" que los locales llaman "cambio de luna" (Silverio y Jaquet, 2017).

Otro GLOF se produjo el 8 de febrero de 2012, implicando Lagunita 2 (Artizon Bajo) y Lagunita 3 (Artizon Alto). El derrumbe de la morrena lateral izquierda de la laguna Artizon Alto produjo una ola que saltó el dique rocoso de esta laguna y afectó el dique morrénico (material depositado durante el evento de 1997; Figura 8B) de la laguna Artizon Bajo (Lagunita 2). El aluvión fue absorbido por la laguna Jatuncocha, ubicada aguas

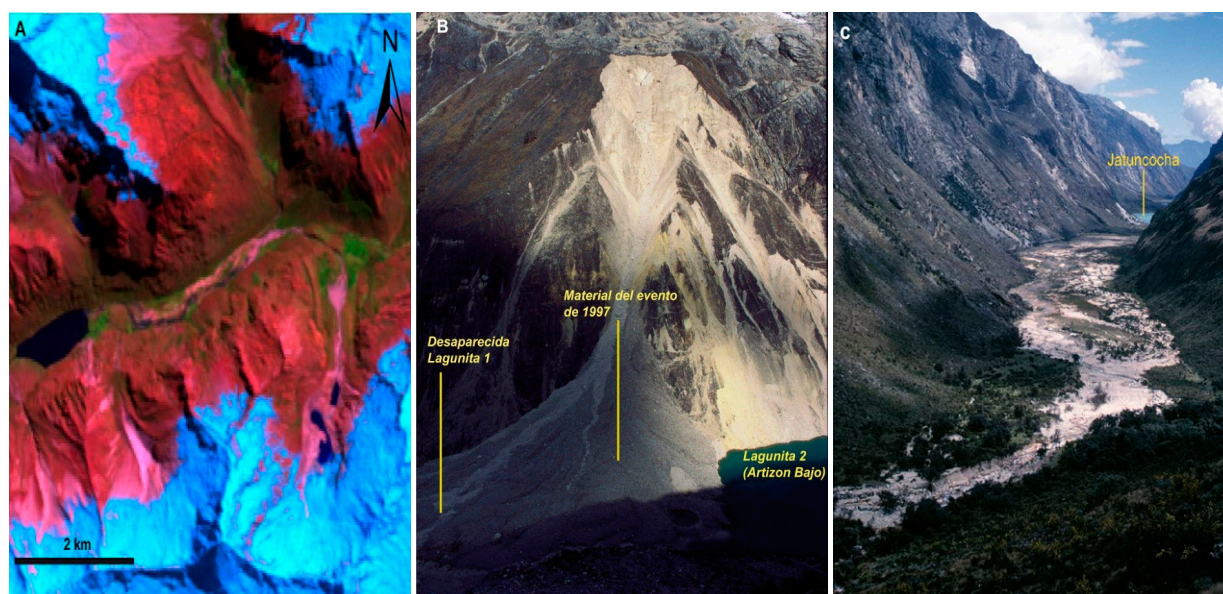


Figura 8. A) Trazas del aluvión de marzo de 1997, imagen Landsat 7 ETM+ 26.5.2000; B) Zona del derrumbe que provocó el evento de 1997 y material depositado entre el dique de Lagunita 2 y la desaparecida Lagunita 1 (foto W. Silverio, 2003); C) trazas en la quebrada Santa Cruz del aluvión de 1997 (foto W. Silverio, 1999).

abajo en la quebrada Santa Cruz (Emmer et al., 2014). Las imágenes de antes (2010) y después (2013) del GLOF muestran cómo la laguna Jatuncocha absorbió el aluvión (Figura 11). Desafortunadamente, no se tiene una imagen satelital del evento, pues en ese período Landsat 7 ETM+ estaba dañado, razón por la cual la NASA lanzó en el año 2013 su satélite Landsat 8 OLI.

Citamos también, el caso de la laguna Safuna Alta, que el 22 de abril del 2002, desbordó como consecuencia de una avalancha de roca y material de escombros. El evento produjo daños menores en pequeños poblados (UGRH, 2011; Hubbard et al. 2005). A medida que el glaciar se ha retirado, Safuna Alta ha continuado creciendo (Tabla 3; Figura 7; Silverio y Jaquet, 2003). Este incremento ha debilitado las bases de las morrenas contiguas. En períodos de lluvia, las morrenas con bases debilitadas y saturadas de agua se vuelven más inestables y pueden producir un GLOF. Este evento de 2002 ha sido estudiado en detalle por Hubbard et al. (2005). Sin embargo, el objetivo del presente artículo no es el estudio exhaustivo de los GLOF recurrentes en la Cordillera Blanca. El tema de los GLOF recurrentes en la Cordillera Blanca merece un artículo especial.

Desde el punto de vista de seguridad, la desaparición o disminución de volumen de las lagunas significa la disminución del riesgo potencial de desborde para la

población aguas abajo. Pues, menos agua implica una reducción del peligro de un GLOF, que generalmente se manifiesta durante el período de lluvias. Pero al mismo tiempo, la disminución del volumen de agua en las lagunas significa la disminución de las reservas hídricas para una región que es eminentemente agrícola.

Fragmentación de Glaciares Cubiertos (DCG: Debris-Covered Glacier) y Su Transformación en Lagunas

El primer inventario de glaciares de la Cordillera Blanca no da cuenta del número de los DCG (glaciar rocoso o glaciar cubierto) existentes en la Cordillera Blanca, ni de la superficie de estos cuerpos glaciares. Glaciares y DCG fueron contabilizados como un solo elemento (Ames et al., 1988). En las cifras de 1970, "también han sido considerados todos los glaciares rocosos (cubiertos)" (Ames, comunicación personal).

En la Cordillera Blanca en 1987, existían 18 DCG. Su cobertura total fue estimada en 18 km² (Silverio y Jaquet, 2005). Racoviteanu et al. (2008) y UGRH (2010a) mencionan la existencia de los DCG, pero sin dar detalles de su ubicación geográfica exacta. En el año de 1987, el mayor número de glaciares cubiertos se concentraba en la zona norte del macizo (12), con cinco en la zona centro y uno en la zona sur (Figura 12).

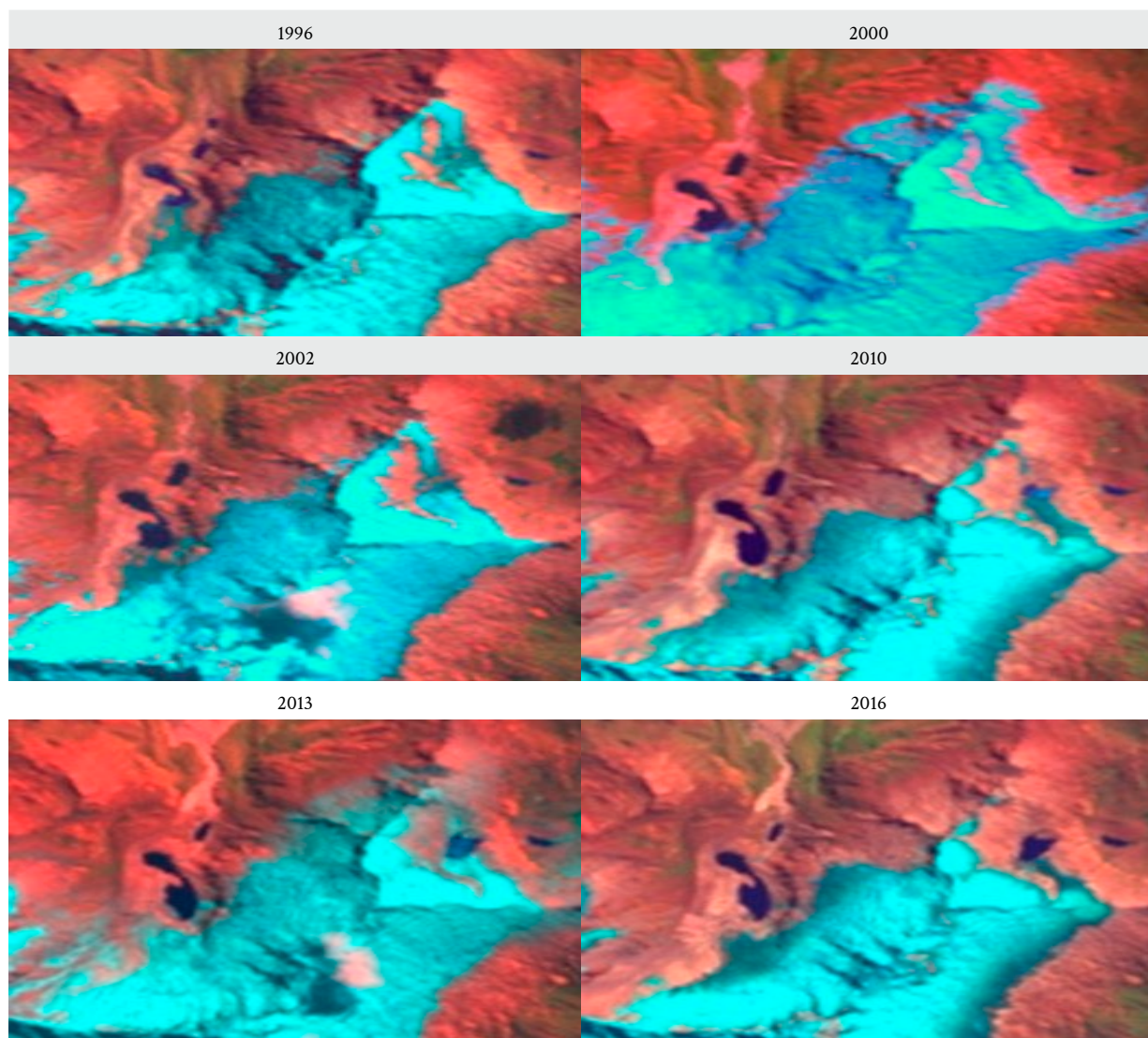


Figura 9. Evolución de Lagunita 2 (Artizon Bajo) y Lagunita 3 (Artizon Alto) entre 1996 y 2016.



Figura 10. Estado de las lagunas *Lagunita 2* (Artizon Bajo) (A) y *Lagunita 3* (Artizon Alto) (B) en 2003.
Fotos: W. Silverio, 2003.



*Fuente: <http://www.andesinfo.blogspot.com.es/2012/03/andes-peru-cordillera-blanca-laguna.html> (fecha de acceso 13/01/2014).

Figura 11. Aspecto de la quebrada Santa Cruz en 2010 y 2013 (antes y después del GLOF de 8 de febrero del 2012).

En 1987, se ubicaban tres DCG en la vertiente este de la cordillera (vertiente del río Marañón; Figura 12: números 7, 13 y 17) y 15 en la vertiente oeste (vertiente del río Santa). En 2021, quedan 16 DCG activos en la Cordillera Blanca, de los cuales tres están en la vertiente este y 13 en la vertiente oeste.

En la Tabla 4 presentamos la lista de las imágenes utilizadas para el monitoreo del impacto del cambio climático en la Cordillera Blanca. Igualmente, indicamos el uso de cada imagen.

Descripción de los DCG

Se desconocen los nombres de la mayoría de los glaciares cubiertos. En la práctica, los DCG que no tienen nombres propios llevan el nombre de la montaña que lo domina o el nombre de la quebrada donde se ubica, o eventualmente el nombre de la laguna con que existe una conexión (ver Figura 12). Para distinguir mejor los DCG, se han hecho cinco ventanas de la Figura 12, las cuales comprenden Norte 1 (N1: para los DCG de 1 al 4), Norte 2 (N2: 5 - 8), Norte 3 (N3: 9 - 12), Centro 1 (C1: 13 - 14), Centro 2 (C2: 15 - 17) y Sud (S: 18).

1. DCG Yuracocha

El DCG Yuracocha está ubicado en una pequeña quebrada no es bien definida en la parte norte de la Cordillera Blanca, cerca de la laguna Cullicocha. Este DCG es contiguo con la laguna Yuracocha y está dominado por el nevado Santa Cruz Chico (5800 m). Su lado SE está dominado por Santa Cruz Grande (6241 m). Se desconoce algún estudio sobre este glaciar cubierto (Figura 13A). Su evolución, entre 1987 y 2020, aparece en la Figura 13B. En 2015, apareció un "charco de agua" que se confirma en la imagen del 2020 (Figura 13B). Una imagen de Google Earth (consultado 15/03/2021) confirma esta tendencia y da información adicional que el DCG se está descomponiendo.

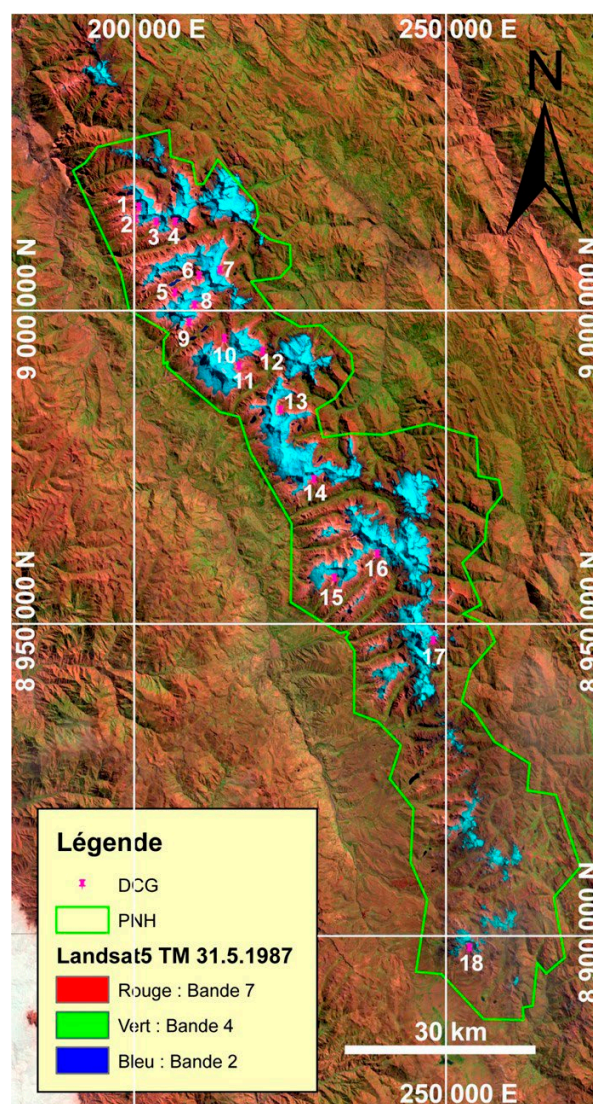


Figura 12. Distribución de los DCG en la Cordillera Blanca en 1987. Imagen de fondo Landsat 5 TM 31.5.1987, composición color bandas R,V,A: 7,4,2.

Tabla 4. Imágenes satelitales de la serie Landsat utilizadas para el monitoreo de los DCG en la Cordillera Blanca. Adaptado de Silverio y Jaquet (2017).

Satélite/Sensor	Fecha	Path/Row	Pixel (m)	Uso, mapeo	Fuente
Landsat 2 / MSS MSS: Multispectral Scanner System	4 Agosto 1975	8/66	60	Peligros naturales	UNEP/DEWA/ GRID-Sioux Falls (USA)
Landsat 5 / TM TM: Thematic Mapper	31 Mayo 1987	8/66, 8/67	30	DCG, cobertura glaciar	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 5 / TM	26 Julio 1996	8/66, 8/67	30	DCG, cobertura glaciar	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 7 ETM+/ ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus	26 Mayo 2000	8/66, 8/67	30	Monitoreo de lagunas	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 7 / ETM+: ETM+:	17 Junio 2002	8/66, 8/67	30	DCG, cobertura glaciar	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 5 / TM TM: Thematic Mapper	18 Agosto 2010	8/66, 8/67	30	DCG, cobertura glaciar	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 8/ OLI OLI: Operational Land Imager	9 Julio 2013	8/66, 8/67	30	Monitoreo de laguna	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 8 / OLI	12 Julio 2014	8/66, 8/67	30	DCG, cobertura glaciar	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 8 / OLI	29 Junio 2015	8/66, 8/67	30	DCG, monitoreo de lagunas	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 8 / OLI	30 Mayo 2016	8/66, 8/67	30	DCG, cobertura glaciar	http://glovis.usgs.gov/
Landsat 8 / OLI	10 Junio 2020	8/66, 8/67	30	Monitoreo DCG	http://glovis.usgs.gov/

2. DCG Santa Cruz 1

Este DCG está ubicado en una quebrada no muy accesible. Por su lado NE, está dominado por Santa Cruz Grande (6241 m) (Figura 13A). No se conoce algún estudio sobre este DCG. Su evolución entre 1987 y 2020 (Figura 13B) muestra la formación de "charcos" de agua en su interior, confirmado por una imagen de Google Earth (consultado 15/03/2021).

3. DCG Santa Cruz 2

El DCG Santa Cruz 2 está dominado por el nevado Abasraju (5785 m). Como Santa Cruz 1, está ubicado en un sitio de difícil acceso (Figura 13A). En 1987, en su parte inferior existía una "lagunilla" que con el transcurso de los años se ha agrandado (Figura 13B). Una imagen de Google Earth (consultado 15/03/2021) ha confirmado esta tendencia.

4. DCG Santa Cruz 3

El DCG Santa Cruz 3 está ubicado al pie del nevado Quitaraju (6036 m) (Figura 13A). Entre 1987 y 2020, en contraste con la desintegración de Santa Cruz 1 y 2, Santa Cruz 3 parece no haber tenido muchos cambios (Figura 13B).

5. DCG Parón 1 (Jatunraju)

El DCG Parón 1 o Jatunraju está ubicado en la quebrada Parón. Por el lado sur está dominado por Huandoy Este (6070 m) y Huandoy Norte (6395 m). Por el norte, domina el dique de la laguna Parón (Figura 14A).

Hasta el momento, este DCG ha sido lo más estudiado y quizás el único que cuenta con estudio. El interés por este DCG comienza en los años 1960, cuando se observó que éste transportaba material que podría afectar el dique de la laguna Parón, considerada peligrosa (Emmer et al., 2014). La laguna Parón era considerada como un reservorio natural para regular el río Santa en época de estío, para la producción de electricidad, y al mismo tiempo representaba un peligro, aguas abajo, para la población de Caraz y la central hidroeléctrica del Cañón del Pato. Por tal razón, se decidió bajar el nivel del agua, haciendo un túnel de 1.2 km, a 45 m de profundidad, en el lecho sólido (granito) del lago (Carey, 2010). A causa de cambios políticos, las dificultades técnicas y financieras, el lago fue mayormente drenado en 1984, removiendo 58 millones de m³ de agua (Carey, 2010). En agosto de 2022, la laguna aún no había recuperado su nivel de antaño, [aunque hoy en día (2024) ha regresado a casi su máximo nivel. – Nota del editor.]

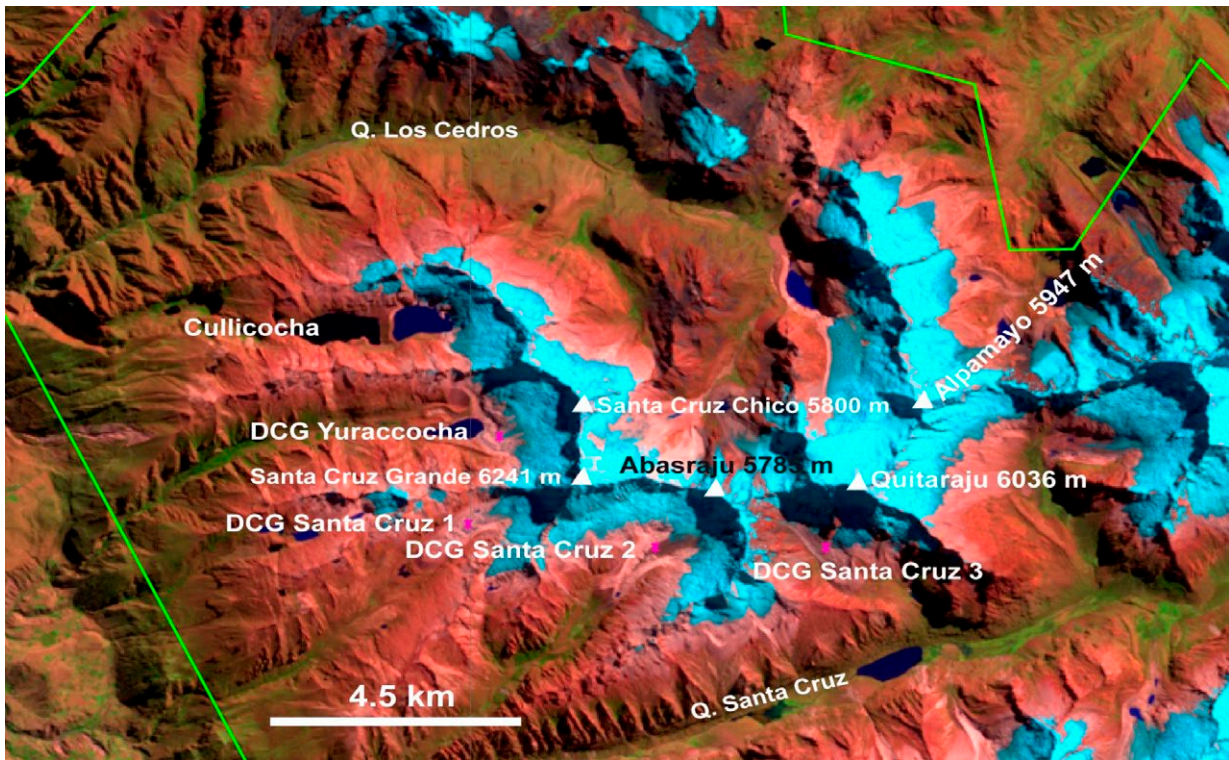


Figura 13A. Ubicación de los DCG Yuraccocha, Santa Cruz 1, Santa Cruz 2 y Santa Cruz 3 (Figura 12: DCG 1, 2, 3, 4).

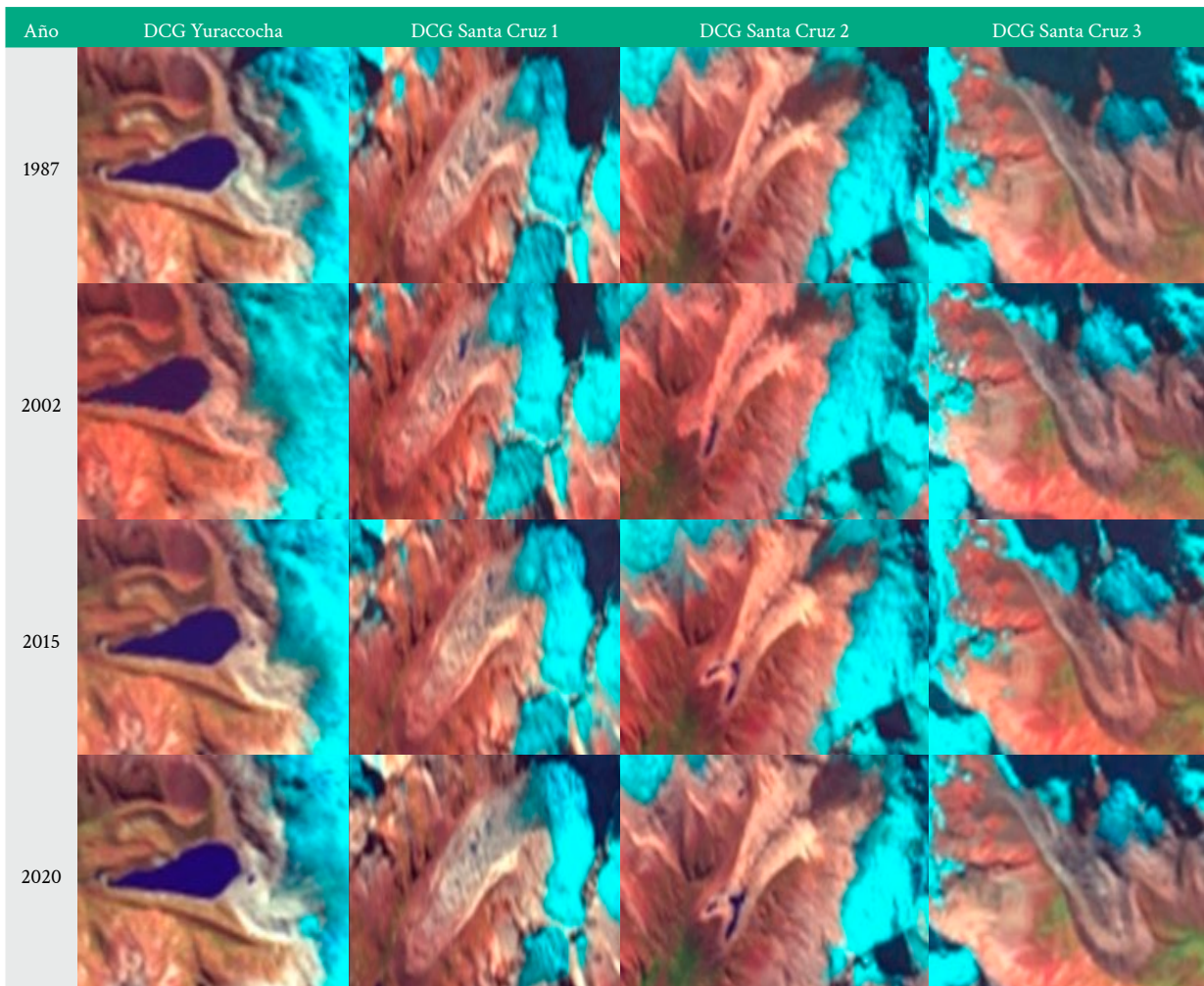


Figura 13B. Evolución de los DCG Yuraccocha, Santa Cruz 1, Santa Cruz 2 y Santa Cruz 3, entre 1987 y 2020.

El estudio realizado por Emmer et al. (2014) menciona la fragmentación de Jatunraju y la formación de "charcos de agua". Pero estos no se desarrollan en lagunas porque este DCG presenta una pendiente empinada que no permite la acumulación del agua. La secuencia de las imágenes satelitales entre 1987 y 2020 da cuenta de la aparición y desaparición de charcos de agua (Figura 14B), confirmada por una imagen de Google Earth (consultado 21/03/2021).

6. DCG Parón 2

El DCG Parón 2 está dominado por el circo glaciar conformado por la Pirámide de Garcilaso (5885 m) y Chacaraju Oeste (6112 m) (Figura 14A) y no ha conocido grandes transformaciones. La laguna que está situado al pie parece no haber experimentado muchos cambios (Figura 14B).

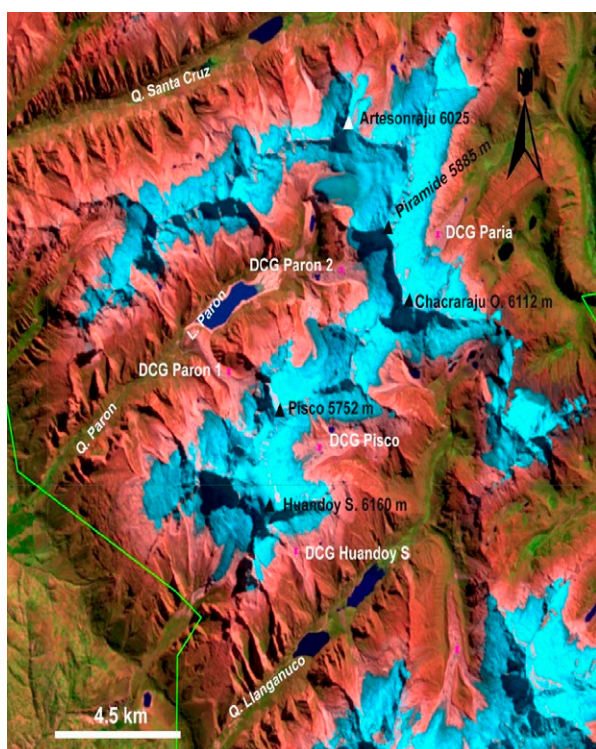


Figura 14A. Ubicación de los DCG Parón 1 (Jatunraju), Parón 2, Paria y Pisco (Figura 12: DCG 5, 6, 7, 8).

7. DCG Paria

El DCG Paria está ubicado en la pequeña quebrada Paria que es adyacente de la quebrada Huaripampa, en la vertiente este de la Cordillera Blanca. Está dominado por los nevados Chacaraju Este (6001 m) y Oeste (6112 m) y la Pirámide de Garcilaso (5885 m) (Figura 14A). Al pie de este DCG observamos, entre 1987 y 2020, la presencia de una pequeña laguna que no ha crecido mucho durante este período de tiempo (Figura 14B).

8. DCG Pisco

Este DCG está alimentado por el circo glaciar dominado por Huandoy Sur (6166 m), Norte (6395 m) y Este (6070 m), y Pisco (5752 m). Su ubicación se aprecia en la Figura

14A. En 1987, existía un charco de agua al pie de este DCG. Con el transcurso de los años, este charco se ha consolidado (Figura 14B). Durante una visita en julio del 2004, se observó que el charco se había convertido en una pequeña laguna, y con el transcurrir de los años, ésta se ha consolidado (Figura 14B). Una imagen de Google Earth (consultado 21/03/2021) muestra que la pequeña laguna ha crecido y que al interior del DCG hay la presencia de charcos de agua a vigilar.

9. DCG Huandoy Sur

El DCG Huandoy Sur está ubicado al pie de Huandoy Sur (6166 m) (Figura 15A). Entre 1987 y 2020, pareciera no haber cambiado nada (Figura 15B). Pero la realidad es otra. Según Silverio (1999), en enero y diciembre de 1995, este DCG ha sido implicado en dos eventos de flujo de escombros torrencial, lo que afectó la ruta Yungay - Yanama en un tramo de 300 m (primer evento) y 450 m (segundo evento). El evento se produjo entre 4600 y 4800 m de altitud. El segundo evento transportó 12.75×10^4 m³ de material morrénico (entre barro y bloques de piedra y de hielo).

10. DCG Chopi-Huasca

Este DCG está dominado por los nevados Chopicalqui (6354 m), Huascarán Sur (6768 m) y Norte (6655 m) (Figura 15A). Como la mayoría de los DCG, el de Chopi-Huasca se está desintegrando. Desde de 2010 han aparecido "cuerpos de agua" que, con el transcurso de los años, felizmente no han crecido mucho (Figura 15B). Hemos hecho saber nuestra preocupación a las autoridades competentes, en este caso, a la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Según ellos, se trata de un "charco de agua" que no representa ningún peligro. Hay que recordar el caso de Lagunita 3 (ahora, Artizon Alto), que desde un charco se ha convertido en una laguna y ha producido un GLOF en dos oportunidades (ver sección 3.2, Figuras 7, 8, 9, 10, 11). En 2017, el guía de montaña Daniel Milla me confirmó la existencia de este cuerpo de agua visible desde los satélites.

11. DCG Huasca-Chopi

El acceso a este DCG se realiza por la quebrada Ulta. Este DCG está dominado por los nevados Huascarán Sur (6768 m) y el Chopicalqui (6354 m) (Figura 15A). Entre 1987 y 2020, en su parte central se han formado cuerpos de agua, que felizmente no se han desarrollado (Figura 15B). Una imagen de Google Earth (consultado 26.3.2021) confirma esta tendencia.

12. DCG Chopi

Este DCG se ubica al fondo de la quebrada Ulta, al pie del nevado Chopicalqui (6354 m) (Figura 15A). Para 1987, se nota la presencia de un charco de agua, que entre 2002 y 2020 se ha consolidado y se ha convertido en una laguna (Figura 15B). No conocemos si hubo algún estudio con respecto a este DCG. Una imagen de Google Earth (consultado 26.3.2021) confirma la presencia de una laguna amenazante.

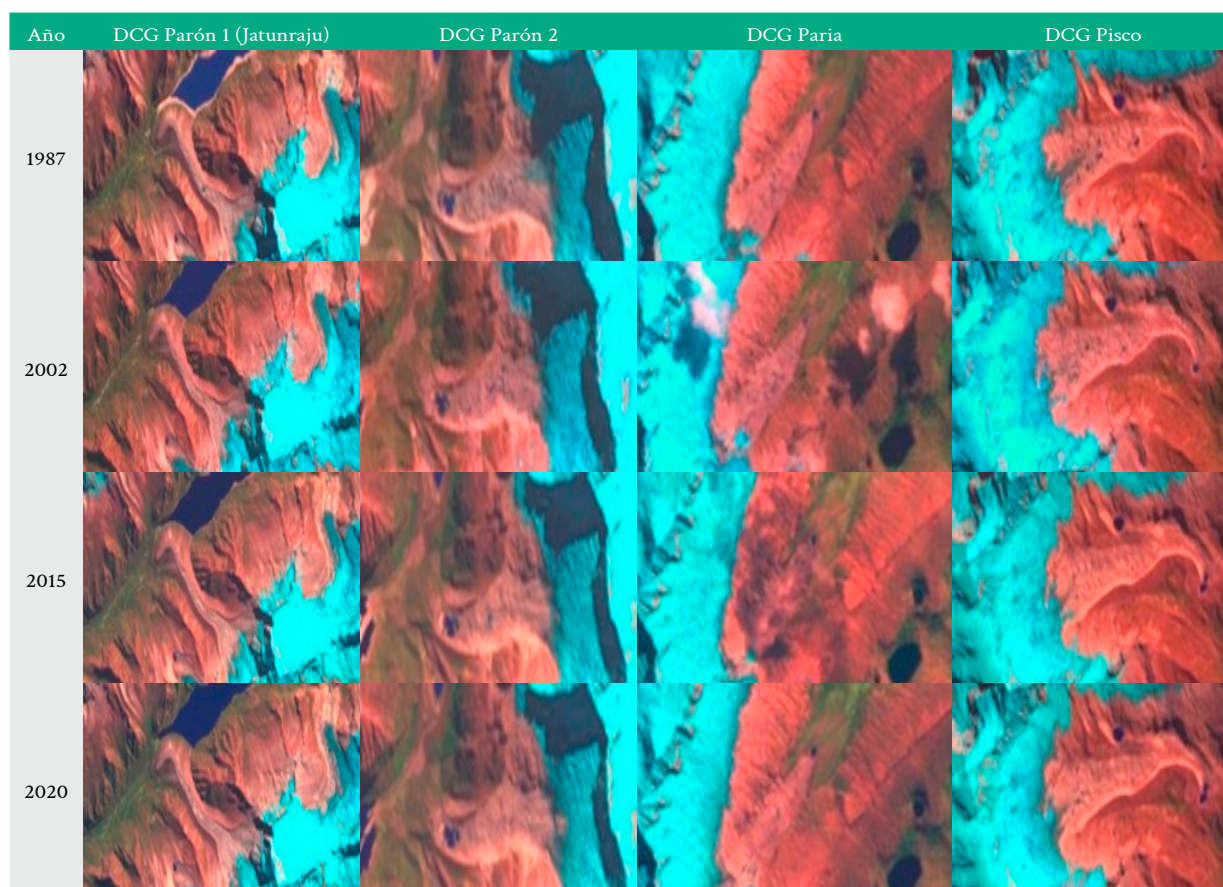


Figura 14B. Evolución de los DCG Parón 1 (Jatunraju), Parón 2, Paria y Pisco, entre 1987 y 2020.

13. DCG Hualcán

El DCG Hualcán está ubicado en la vertiente este de la Cordillera Blanca. Está dominado por el nevado Hualcán (6122 m) (Figura 16A). Entre 1987 y 2020, parece haber sido un DCG sin historias (Figura 16B). Pero como todos los DCG, por falta de aportes de los glaciares adyacentes o con quienes comunica, este DCG se está secando, al mismo tiempo se está fragmentando. Una imagen de Google Earth (consultado 31.3.2021) muestra la presencia de cuerpos de agua que, según las condiciones climáticas y topográficas, pueden convertirse en lagunas.

14. DCG Copa

El DCG Copa está dominado por el complejo Copa con su cumbre principal de 6188 m de altitud (Figura 16A). Entre 1987 y 2020 pareciera no haber tenido cambios, pero la realidad es otra. Como todos los DCG observados hasta aquí, por falta de aportes de glaciares se está secando (Figura 16B). Además, una imagen de Google Earth (consultado 31/03/2021) confirma la tendencia general de fragmentación de los DCG y la presencia de cuerpos de agua (charcos).

15. DCG Llaca

El DCG Llaca está ubicado al fondo de la quebrada del mismo nombre y dominado por el circo glaciar conformado por los nevados Ranrapalca (6162 m) y Ocshapalca (5888 m) (Figura 17A).

Como consecuencia del aluvión de Palcacocha de 1941 que destruyó una parte de la ciudad de Huaraz, se han realizado obras de seguridad y encauzamiento en las lagunas que circundan esta ciudad. Una de las lagunas beneficiadas con obras fue Llaca. Su dique artificial fue inaugurado en 1977 (UGRH, 2005; Carey, 2010). Para este año su superficie era de 63,312 m² y su volumen de 749,000 m³. Mediciones realizadas en 2003 indican una superficie de 43,988 m² y un volumen de 274,305 m³. Esto indica que contrariamente a muchas lagunas, durante 26 años Llaca ha decrecido en área en 19,324 m² y su volumen ha disminuido 474,695 m³.

Si la laguna Llaca no ha crecido como las demás lagunas es porque el DCG se mantiene en buen estado, pues la laguna y el DCG están protegidos por el nevado Ranrapalca (6162 m). Este nevado sirve como una barrera contra el aire húmedo proveniente de la selva amazónica, que pasa por el collado entre los nevados Palcaraju y Pucaranra, resultando que el lado este de la montaña está más afectado por el retroceso glaciar que el lado oeste.

Desde 2002, se observa la presencia de charcos de agua. Hasta el 2020, estos charcos han crecido y multiplicado (Figura 17B). Si la laguna y los charcos se logran juntarse, allí veremos una laguna más grande, que en el futuro podría convertirse en una amenaza para la parte norte de la ciudad de Huaraz. Una imagen de Google Earth (consultado 06/04/2021) indica la formación inminente de una laguna grande.

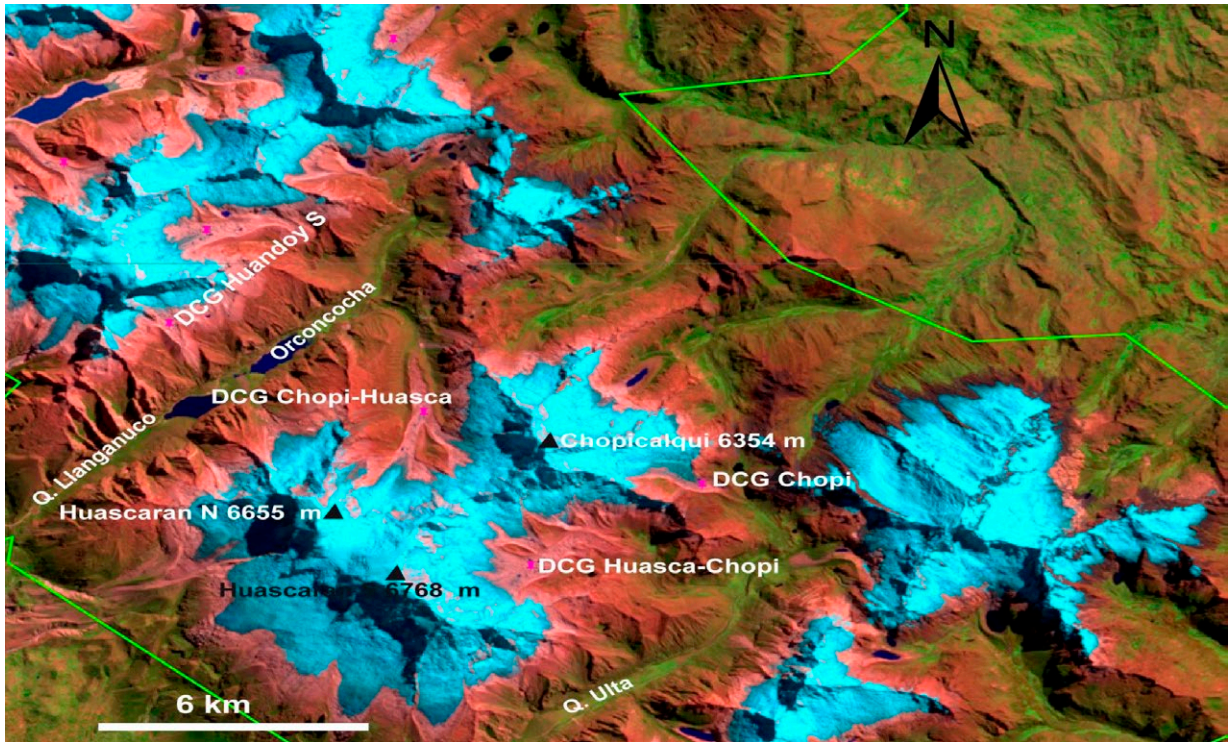


Figura 15A. Ubicación de los DCG Huandoy Sur, Chopi-Huasca, Huasca-Chopi y Chopi (Figura 12: DCG 9, 10, 11, 12).

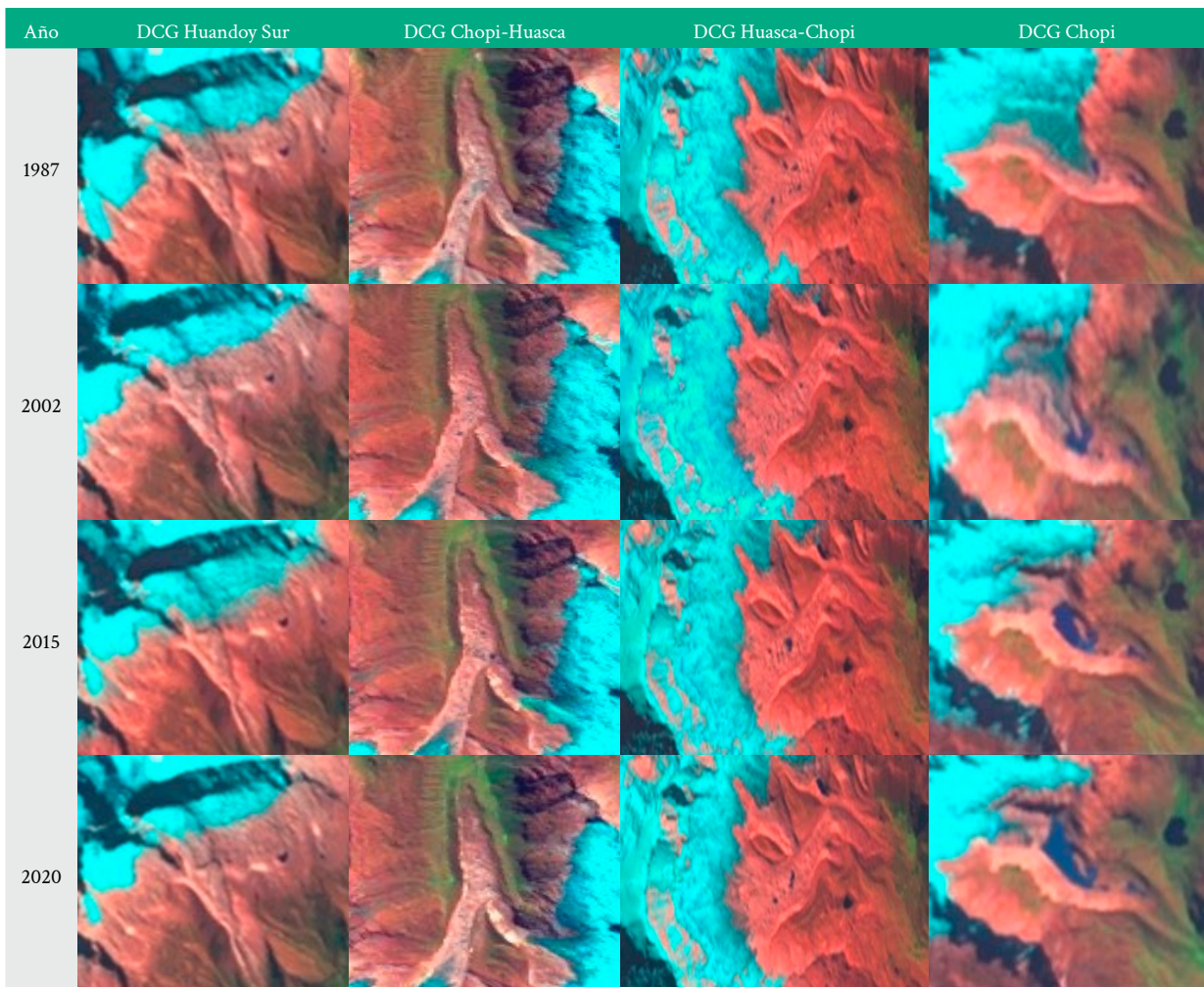


Figura 15B. Evolución de los DCG Huandoy Sur, Chopi-Huasca, Huasca-Chopi y Chopi, entre 1987 y 2020.

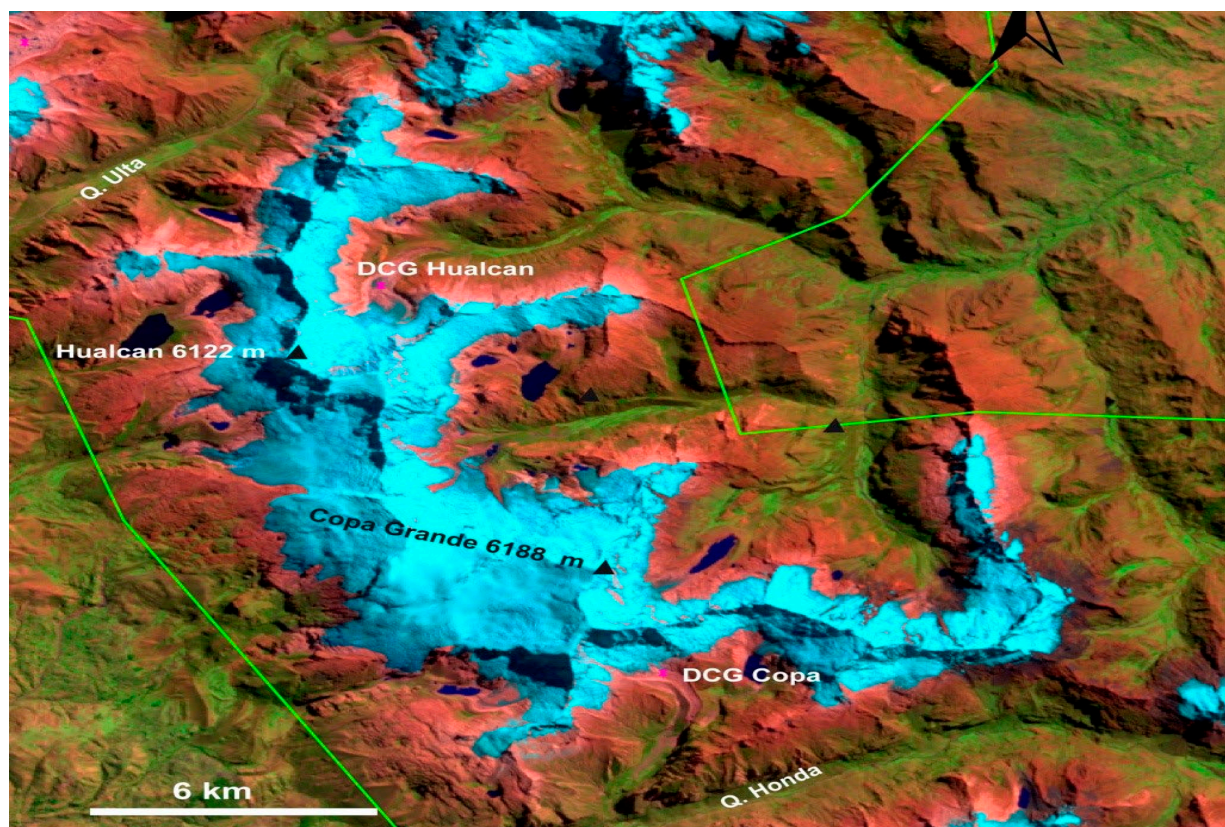


Figura 16A. Ubicación de los DCG Hualcán y Copa (Figura 12: DCG 13, 14).

16. DCG Cojup

Este DCG está ubicado al fondo de la quebrada del mismo nombre, está dominado por los nevados Palcaraju (6274 m de altitud) y Pucaranra (6156 m) y también es conocido como Palcacocha (Figura 17A). Después del aluvión de 1941, que destruyó una parte de la ciudad Huaraz, esta laguna ha sido la más monitoreada en la Cordillera Blanca. Su dique fue inaugurado en 1974, y sus dimensiones iniciales fueron un área de 66,800 m² y un volumen de 579,400 m³. En 2003, su área fue 342,332 m² y su volumen 3,359,776 m³. Su profundidad casi no ha cambiado de 14 m en 1974 y 14.94 m en 2003 (UGRH, 2005). Las cifras de 2003 divergen un poco con las cifras presentadas por Vilímek et al. (2005).

Mientras el DCG Cojup se retiraba, Palcacocha ha continuado decreciendo (Figura 17B), en 2009, su superficie fue de 528.4x1000 m² y su volumen de 17.325x1000,000 m³ (Emmer y Vilímek, 2013). Para 2010, se estimó una superficie de 47 ha (470,000 m²) a partir de las imágenes satelitales Landsat 5 TM (Tabla 3). Bien entendido, este valor es sujeto a la precisión de la resolución de la imagen (pixel = 30 m) (ver Tabla 3). Y en ese año, ya tomaría su forma actual. Las imágenes de 2014 y 2020 muestran que ya no hay mayores cambios a nivel de superficie de la laguna Palcacocha (Figura 17B).

Desde el 2003, Palcacocha representa una gran preocupación para INAIGEM y UGRH (ANA), quienes siguen monitoreando la laguna y se ha hecho eco a nivel internacional. El 19 de marzo 2003, se produjo un derrumbe de

la morrena, al fondo en el margen izquierdo de la laguna (Vilímek et al., 2005; Klimeš et al., 2016). Afortunadamente, el material de escombros se deslizó sobre la laguna (Klimeš et al., 2016), haciendo rebalsar el nivel del agua que erosionó el dique de la laguna. Este evento privó a la ciudad de Huaraz de agua potable durante una semana (Carey, 2010; Silverio, 2007; Klimeš et al., 2016).

A comienzos de abril 2003, después de un análisis de las imágenes ASTER datadas de 05/11/2001 y de 08/04/2003, la NASA (National Aeronautics and Space Administration, EE.UU.) publicó en su portal un artículo sobre un posible desastre en los Andes que implicaría Palcacocha. La noticia hacía referencia a la detección de una "falla" en el glaciar, que provocaría su derrumbe sobre la laguna, lo que representaba una severa amenaza para Huaraz (Silverio, 2007; Vilímek et al., 2005). La noticia creó pánico en la población local y nacional, que para esa fecha esperaba celebrar la Semana Santa. Como las reservaciones se anularon, el sector turismo fue afectado y las pérdidas fueron enormes, considerando que los ingresos de la región provienen principalmente de la actividad turística. Lo más lamentable en aquel momento fue que la población confiara más en la NASA que en sus autoridades (Silverio, 2007).

Una noticia de ese tipo puede generar confusión en la población. Por eso, antes de pregonarlo se necesita una verificación en el campo. Tal es así que en julio y agosto del 2003, constatamos que la famosa "falla" de la NASA no era más que una barra rocosa de aproximadamente 100 m de alto que fue puesto al descubierto por el retroceso

glaciar (Silverio, 2007). Para una mejor visión de la situación, presentamos dos estados de Palcacocha y el DCG Cojup entre los veranos andinos de 1989 y de 2003 (Figura 17C).

17. DCG Huantsán

Este DCG se ubica en la vertiente este de la Cordillera Blanca y está dominado por el nevado Huantsán (6395 m de altitud) (Figura 17A). No se conoce nada a propósito de este DCG. Entre 1987 y 2020, a simple vista parece que este DCG no ha sufrido cambios (Figura 17B) pero en realidad, se está fragmentando como los demás DCG de la Cordillera Blanca y está confirmado por una imagen en el portal de Google Earth (consultado 06/04/2021), que indica la fragmentación y la aparición de charcos de agua en este DCG, que necesitarán ser monitoreados en el futuro.

18. DCG Caullaraju

El último DCG que hemos detectado en la imagen de 1987 es aquello que lo hemos denominado Caullaraju. Se

ubica en el extremo sur de la Cordillera Blanca y es dominado por el nevado Caullaraju (5682 m). A 1.4 km al sureste pasa la gran falla geológica de la Cordillera Blanca (Figura 18A).

En 1987, al interior del DCG se observa la presencia de pequeños charcos de agua y en la parte baja, una lagunilla. En 2002, observamos la presencia de un charco de agua al centro del DCG y se mantiene la lagunilla de la parte baja.

Entre 2014 y 2020, observamos la presencia de charcos de agua al interior, una fragmentación evidente y se mantiene la lagunilla en la zona inferior (Figura 18B).

Una imagen de Google Earth (consultado 12/04/2021) indica la presencia de dos lagunillas en la parte baja, que en los próximos años podrían juntarse y formar una laguna.

Conclusión

Más de 30 años de observación de la Cordillera Blanca, usando los Sensores Remotos y el SIG (Sistema de Infor-

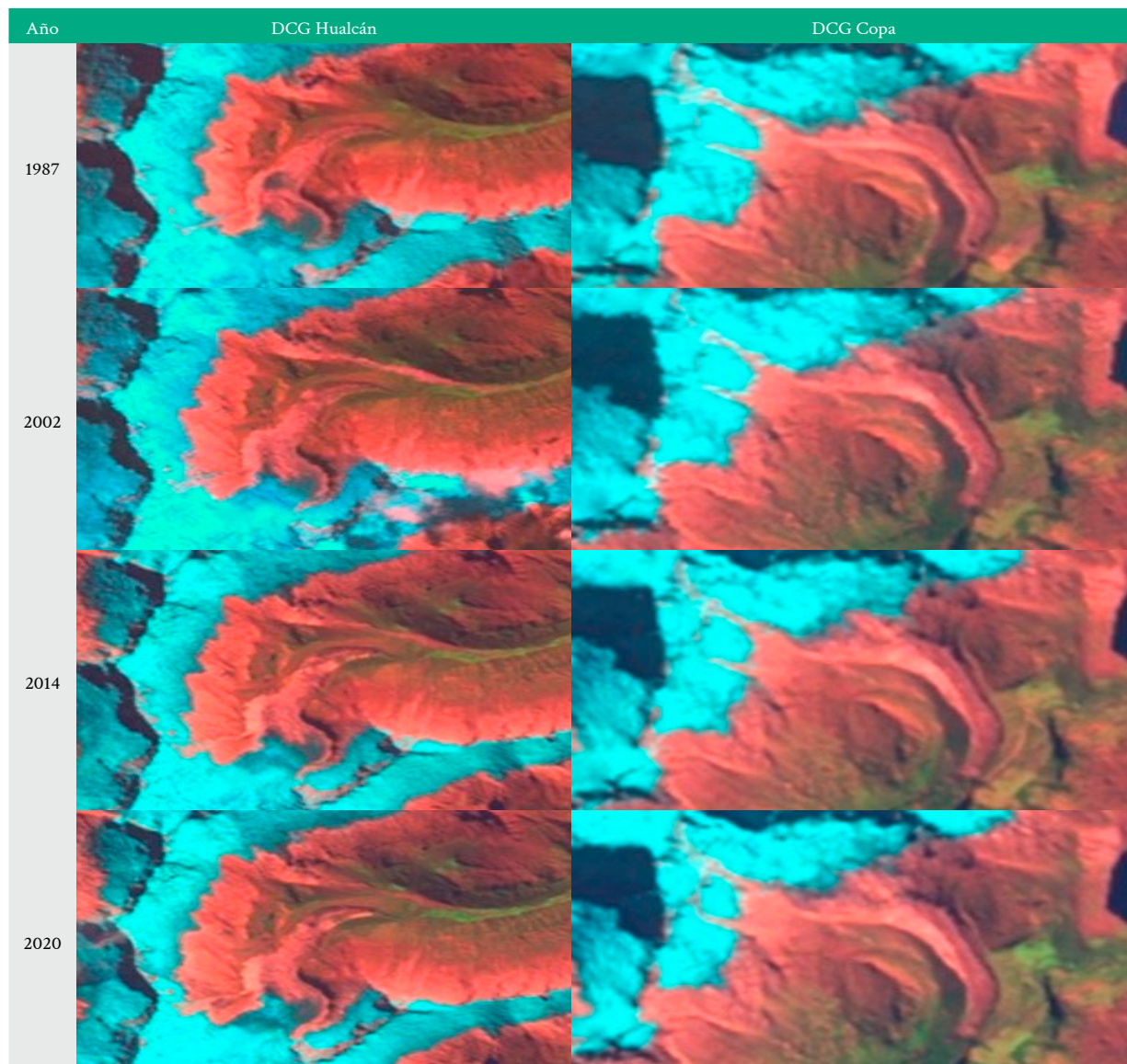


Figura 16B. Evolución de los DCG Hualcán y Copa entre 1987 y 2020.

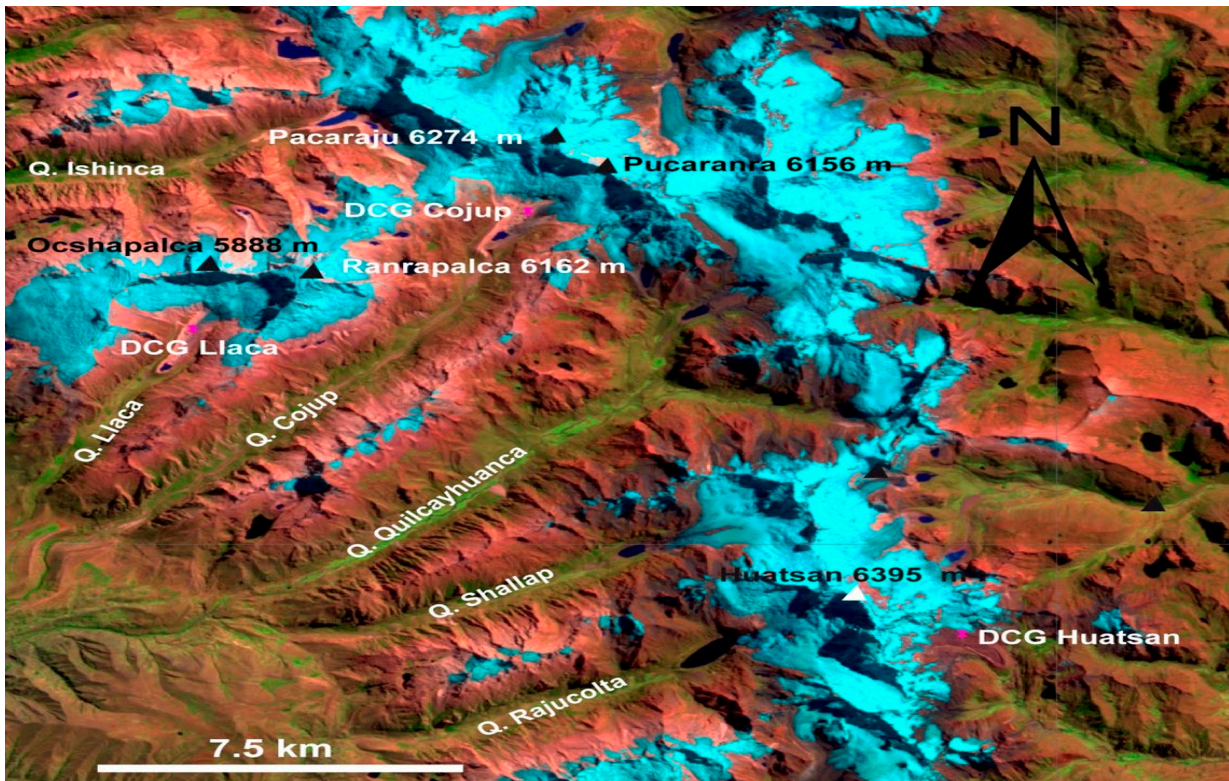


Figura 17A. Ubicación de los DCG Llaca, Cojup y Huatsán (Figura 12: DCG 15, 16, 17).

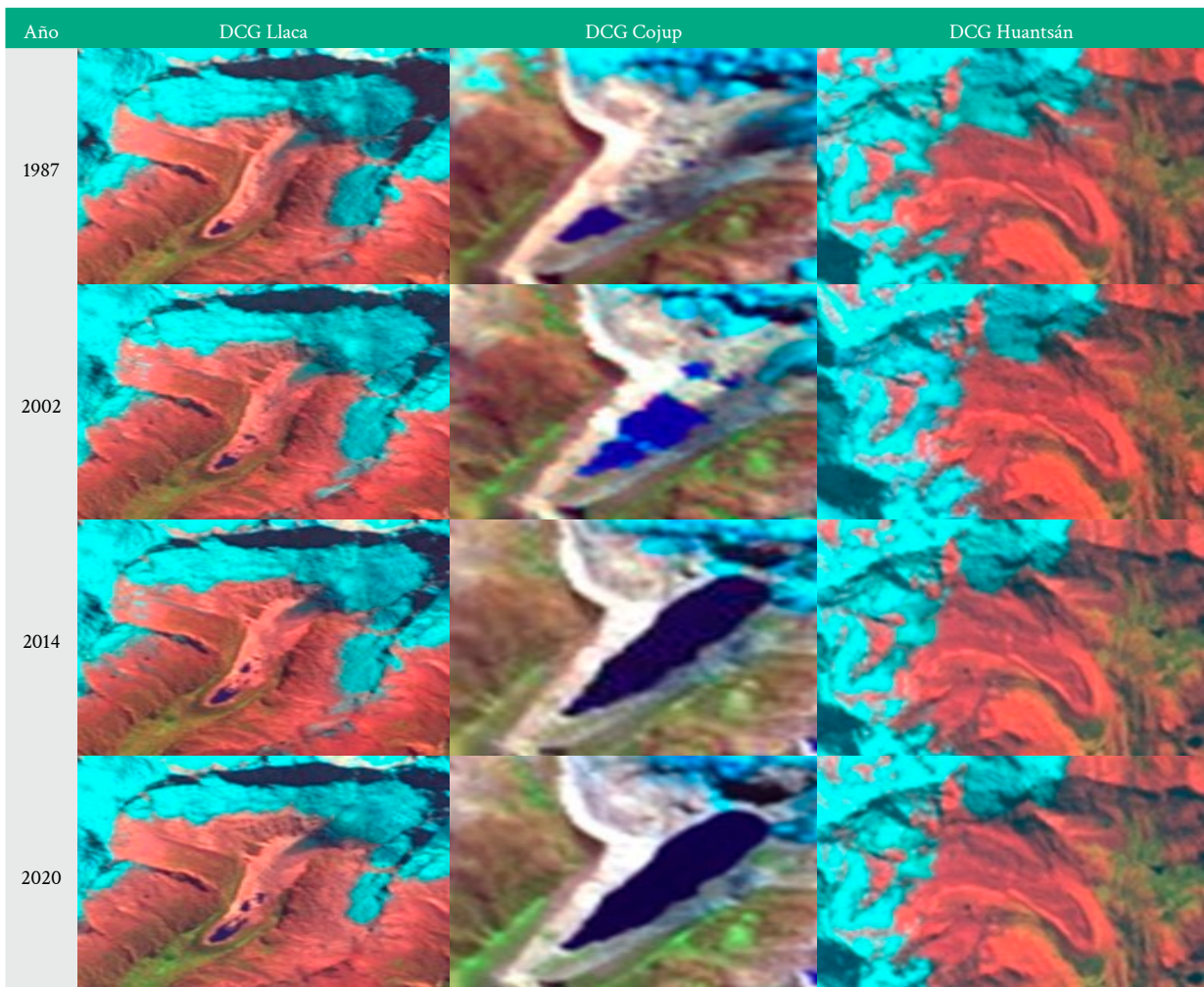


Figura 17B. Evolución de los DCG Llaca y Huatsán entre 1987 y 2020.

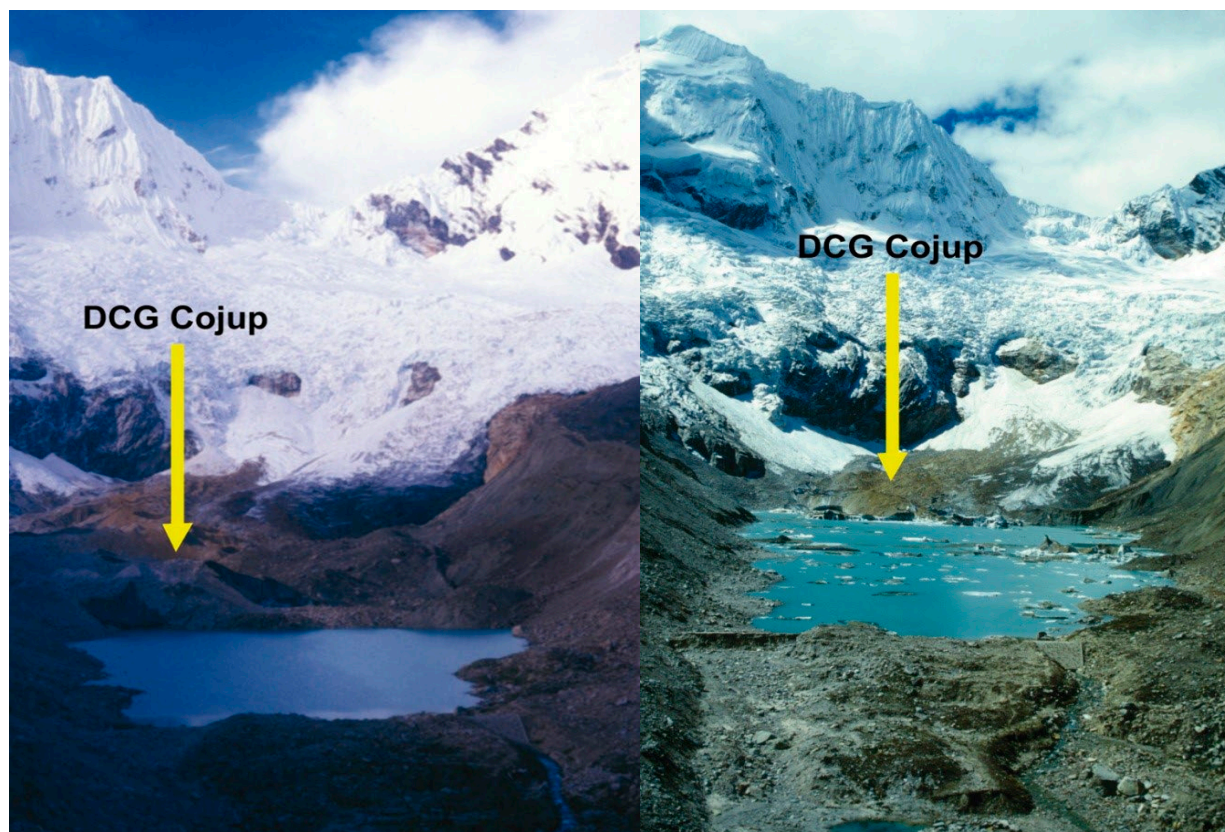


Figura 17C. (izquierda) Verano andino 1989 - Palcacocha se presenta como una laguna pacífica; detrás está el DCG Cojup. (derecha) Verano andino 2003 - Después del evento de marzo del mismo año, se ve cómo el desborde afectó la obra de seguridad; detrás, restos del DCG Cojup. Modificado de Silverio (2019).

mación Geográfica) y acompañado con visitas de campo, dan cuenta de los cambios sufridos por el macizo a causa del cambio climático. Estos cambios se dan en tres ejes: 1) retroceso glaciar, 2) aparición de nuevas lagunas, desarrollo, disminución de volumen de lagunas y desaparición, y 3) fragmentación y conversión de los DCG en lagunas.

Retroceso Glaciar

En 1970 las cordilleras Rosco, Pelagatos y Blanca cubrían una superficie de 723.4 km², y en 2016, 449.2 km². En casi medio siglo (46 años) se han perdido 274.2 km² de glaciar (38%), con un retroceso promedio de 6 km²/año. El fenómeno ocurre principalmente entre 4500 y 5500 m de altitud.

En 2014, Rosco había desaparecido por completo, y en 2016, Pelagatos solo contaba con una superficie de 0.2 km². Si Pelagatos desaparece a su turno, solo quedará glaciar en la Cordillera Blanca. Esto afectará la disponibilidad hídrica, en estado sólido, de la región, tanto para el consumo humano, las actividades económicas extractivas y la agricultura. En efecto, para la región Ancash, en 1972 la disponibilidad hídrica fue <27,000 m³ per cápita, y en el 2005, <16,000 m³ (Silverio, 2007). Además, no olvidemos que el retroceso se da no solamente a nivel de superficie, sino también a nivel de volumen de glaciares.

Pastoruri o Shallap son ejemplos claros del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca. Entre 1987 y 2016, la superficie glaciar de la Cordillera Blanca presenta una cierta

fluctuación, bastante marcada entre 1987 y 2002, entre las fases Niño/Niña del ENSO. Pero entre 2010 y 2016, esta fluctuación es menos visible.

Aparición de Nuevas Lagunas, Desarrollo, Disminución de Volumen de Lagunas y Desaparición

Los glaciares se retiran, dejando espacios para que nuevas lagunas se formen o se desarrollen las existentes. Los glaciares al retirarse, dejan inestable las morrenas laterales de las lagunas y estas en tiempos de lluvia se saturan de agua y producen deslizamientos o derrumban sobre las lagunas, que en su turno producen los desbordes (aluviones) que afectan a la región. En efecto, últimamente son las morrenas que producen los GLOF y frente a ello, solo queda el monitoreo permanente de las lagunas.

En 2016, existían 882 lagunas, la mayoría de ellas ubicadas en sitios remotos y difíciles de acceso. En tiempo de lluvias, estas pueden producir los GLOF. Por lo tanto, se necesita un monitoreo constante vía la teledetección satelital de lagunas potencialmente problemáticas. Por ejemplo, una consulta virtual semanal usando Google Earth puede ser de gran utilidad para la prevención de catástrofes.

Evolución de los DCG (Fragmentación y Conversión de los DCG en Lagunas)

El retroceso glaciar implica igualmente la falta de aporte a los DCG. La mayoría de ellos se está "secando" y por

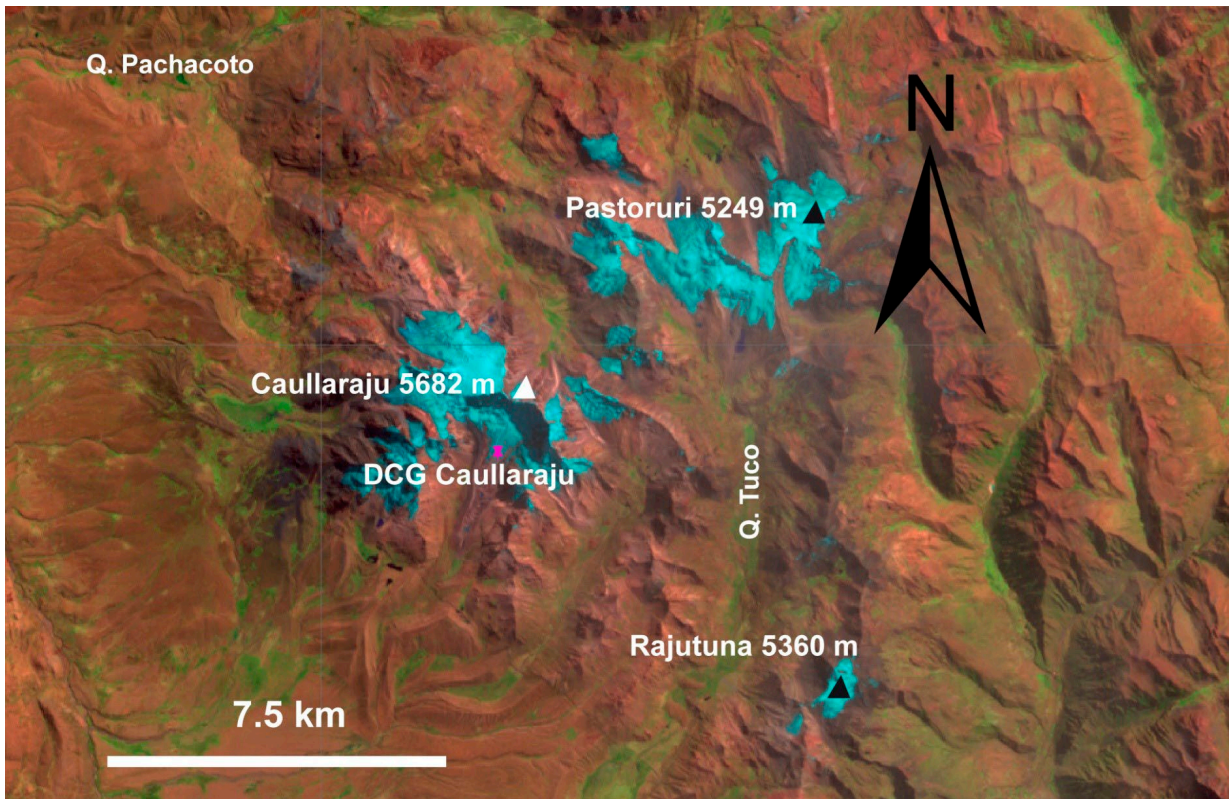


Figura 18A. Ubicación del DCG Caullaraju (Figura 12: DCG 18).

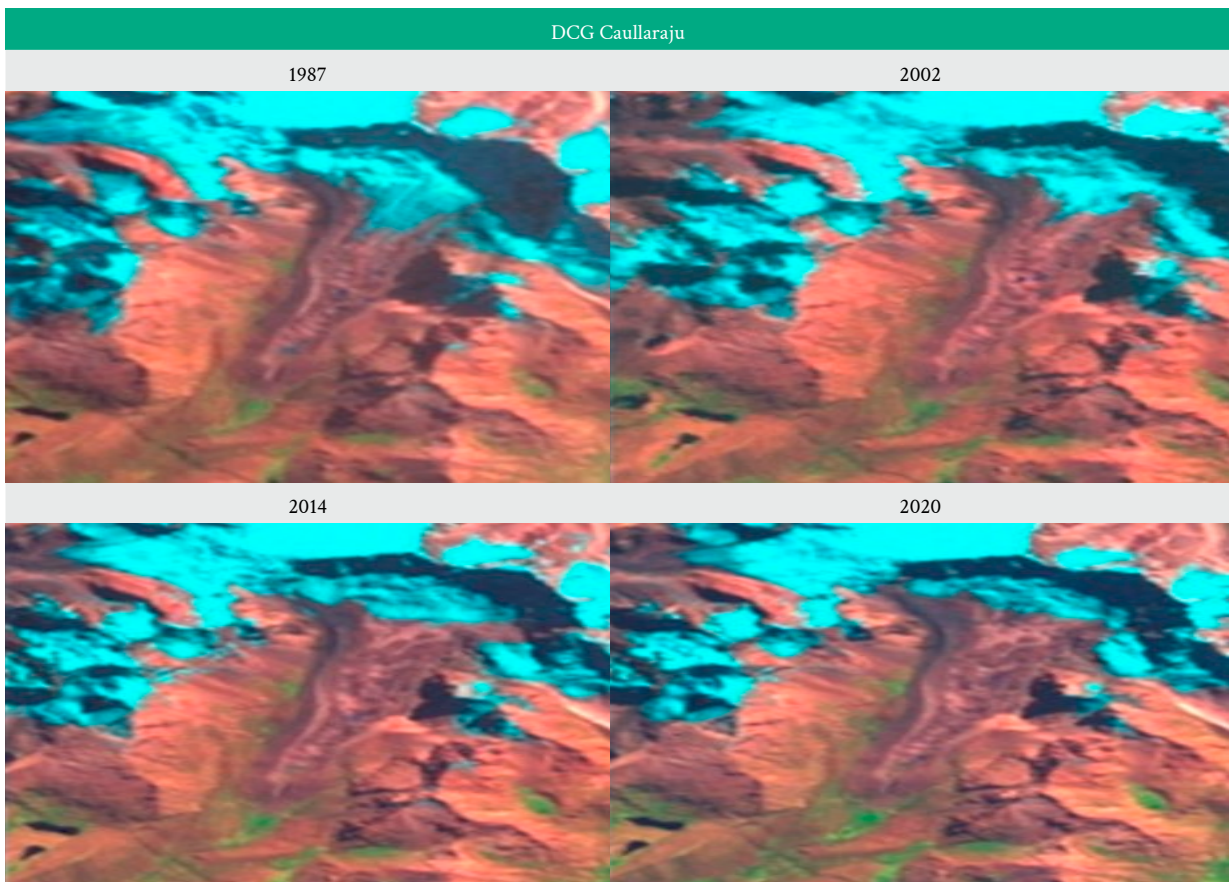


Figura 18B. Evolución del DCG Caullaraju entre 1987 y 2020.

ello se están contractando. Las últimas consultas realizadas usando Google Earth muestran que muchos de los DCG se están desintegrando (fragmentando) y en un gran número de los casos se están formando "charcos de agua", que en el futuro próximo podrían convertirse en lagunas. En tal sentido, sugerimos el monitoreo de todos los DCG al igual que las lagunas o glaciares.

Dos DCG se han convertido en lagunas, uno ubicado en la quebrada Ulta al pie del nevado Chopicalqui y el otro, en la quebrada Cojup, ahora conocido como la laguna Palcacocha; pues, del glaciar cubierto de antes, ya no queda nada. Esta laguna es una constante preocupación para la UGRH (ANA) y el INAGEM quienes lo monitorean.

Los otros 16 DCG están en fragmentación y tienen charcos de agua en su interior que necesitan monitoreo continuo. Este monitoreo podría ser vía la teledetección satelital, pues la mayoría de los DCG están ubicados en sitios de acceso difícil. Actualmente las imágenes satelitales son libres en Internet y este tipo de monitoreo no necesita imágenes de alta resolución. Es suficiente trabajar con imágenes de mediana resolución tipo Landsat.

Otra manera de monitorear fácilmente los DCG es con Google Earth. Una consulta semanal es indispensable, pues las imágenes satelitales son actualizadas en continuo por esta plataforma. Google Earth es una herramienta potente para monitorear los DCG. No requiere ser experto en teledetección, sino solamente tener acceso a Internet. Sin embargo, las observaciones con Google Earth o cualquiera otra imagen necesitan ser completadas con visitas de campo.

Los Sensores Remotos, acoplados a los SIG, son herramientas indispensables para el monitoreo de glaciares, de lagunas y de DCG. Las imágenes satelitales dan cuenta del estado temporal de esos tres elementos de la cordillera e incluso de la cobertura de suelos y de la actividad humana. Esperemos que, en el futuro, se sumen más investigadores y se interesen igualmente a monitorear los DCG y así tendremos estudios implícitos sobre el tema.

Agradecimientos

Quiero extender mis agradecimientos a Zoila Mendoza (en Perú) por su corrección del español. Igualmente, mis reconocimientos a la crítica que ha permitido la mejora de la versión inicial del artículo.

Referencias

- Albert, T. H. (2002). Evaluation of remote sensing techniques for ice-area classification applied to the tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Polar Geography*, 26(3), 210-226.
- Ames, A., Dolores, S., Valverde, A., Evangelista, P., Corcino, J., Ganvini, W. y Zuñiga, J. (1988). *Glacier inventory of Peru*. Huaraz, Perú, Empresa Regional Electronorte Medio, HIDRANDINA S. A. y Unidad de Glaciología e Hidrología. 105 p.
- Ames, A. (1998). A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 34(1), 1-36.
- Burns, P. y 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.
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., McKenzie, J. M., Baraer, M., French, A. y Polk, M. H. (2013). New geographies of water and climate change in Peru: Coupled natural and social transformations in the Santa River watershed. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 363-374.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. New York, Oxford University Press.
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22.
- ELECTROPERÚ. (1974). Mapa Índice de Lagunas de la Cordillera Blanca, al 1:100,000. Huaraz, Glaciología y Seguridad de Lagunas, Electroperú.
- Emmer, A. y Vilímek, V. (2013). Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: An example from the Cordillera Blanca (Peru). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(6), 1551-1565.
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. y Cochachin, A. (2014). Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca, Peru. En Shan, W., Guo, Y., Wang, F., Marui, H. y Strom, A. (Eds.), *Landslides in cold regions in the context of climate change*, 231-252. Suiza, Springer International Publishing.
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V. y Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269-279.
- Francou, B., Ribstein, P. y Pouyaud, B. (1997). La fonte des glaciers tropicaux. *La Recherche*, 302, 34-37.
- Georges, C. (2004). 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca (Perú). *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36(1), 100-107.
- Georges, C. (2005). *Recent glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca and aspects of the climate forcing*. Ph.D. thesis. Innsbruck, Austria, Tropical Glaciology Group,

- Institute of Geography, University of Innsbruck Tropical Glaciology Group. 169 p.
- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J. M., Quincey, D., Richardson S. D., Zapata L., M. Santillan P., N. y Hambrey M. J. (2005). Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(10), 1251-1264.
- INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña). (2018). *Inventario nacional de glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú*. Huaraz, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
- Kaser, G., Ames, A. y Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136-140.
- Kaser, G., Georges, C. y Ames, A. (1996). Modern glacier fluctuations in the Huascarán-Chopicalqui massif of the Cordillera Blanca, Perú. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 91-99.
- Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Gómez, J. y Tamayo, W. (2003). The impact of glaciers on the runoff and reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Perú. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 130-144.
- Kaser, G. y Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge, Cambridge University Press y UNESCO.
- Klimeš, J., Novotný, J., Novotná, I., Jordán de Urries, B., Vilímek, V., Emmer, A., Strozzi, T., Kusák, M., Cochachin Rapre, A., Hartvich, F. y Frey, H. (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: Example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*, 13, 1461-1477.
- Maussion, F., Gurgiser, W., Grosshauser, M., Kaser, G. y Marzeion, B. (2015). ENSO influence on surface energy and mass balance at Shallap glacier, Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 9(4), 1663-1683.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2016). ENSO: Cold & Warm Episodes by Season. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml (Acceded on October 25, 2016)
- Paul, F. (2003). *The new Swiss glacier inventory 2000. Application of remote sensing and GIS*. Ph.D. thesis. Zürich, Suiza, Universität Zürich. 199 p.
- PNH (Parque Nacional Huascarán). (1990). *Plan maestro: Parque Nacional Huascarán; Generalidades y diagnóstico: versión resumida*. Huaraz, Perú, Parque Nacional Huascarán. Documento interno, 162 p.
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W. y Ordoñez, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186), 499-510.
- Silverio, W. (1999). *Essai d'évaluation des instabilités de pente par un système d'information géographique et leur interprétation dans la région de Huascarán (département d'Ancash, Pérou)*. Tesis de especialización en "Análisis y Gestión de Riesgos Geológicos". Ginebra, Suiza, Centro de Estudios de Riesgos Geológicos (CERG), Sección Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad de Ginebra. 84 p.
- Silverio, W. (2003). *Atlas del Parque Nacional Huascarán, Cordillera Blanca, Perú*. Lima, Autor. 70 p.
- Silverio, W. (2007). *Application des SIG pour une gestion durable des ressources hydriques de la Cordillera Blanca (Pérou) [A GIS for the sustainable management of the water resources in Cordillera Blanca (Peru)]*. Tesis doctoral en geografía. Ginebra, Suiza, Université de Genève. 234 p.
- Silverio, W. (2017). *Las cordilleras nevadas del Perú*. Lima, Autor. 60 p.
- Silverio, W. (2019). *Cordillera Blanca - Pérou, des montagnes et des hommes*. Lima, Autor. 111 p.
- Silverio, W. y Jaquet, J.-M. (2003). Cartographie satellitaire des aléas naturels liés aux glaciers dans la Cordillera Blanca (Pérou), entre 1970 et 2000. *Archives des Sciences (Ginebra)*, 56(1), 39-58.
- Silverio, W. y 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.
- Silverio, W. y Jaquet, J.-M. (2014). Cartographie satellitaire de la couverture glaciaire des cordillères andines du Pérou. *Archives des Sciences (Ginebra)*, 67, 109-118.
- Silverio, W. y Jaquet, J.-M. (2017). Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 and 2016 in the context of ENSO. *Archives des Sciences (Ginebra)*, 69, 145-162.
- UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua). (2005). *Lagunas glaciares de la Cordillera Blanca con obras de seguridad*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. 1 p. (documento interno).
- UGRH. (2010a). *Inventario de glaciares Cordillera Blanca*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. 74 p. (documento interno).
- UGRH. (2010b). *Inventario de lagunas de la Cordillera Blanca*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. 84 p., (documento interno).
- UGRH. (2011). *Registro histórico de avalanchas en el departamento de Ancash*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. 4 p., (documento interno).
- UGRH. (2013). *Inventario Nacional de glaciares y lagunas: Glaciares*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos / Lima, Autoridad Nacional del Agua. (documento interno).
- Vaughan, D. G., Comiso, J. C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, Murray, T., P., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Salomina, O., Steffen, K. y Zhang, T. (2013).

Observations: Cryosphere. En Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P. M. (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 317-382. Cambridge y Nueva York, Cambridge University Press.

Vilímek, V., Zapata Luyo, M., Klimeš, J., Patzelt, Z. y Santillán, N. (2005). Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides*, 2, 107-115.

Vuille, M., Kaser, G. y 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.



THE IMPORTANCE OF TRADITIONAL ECOLOGICAL KNOWLEDGE IN UNDERSTANDING ANDEAN SPONTANEOUS COMMUNITY RESPONSE TO INCIDENTS OF GLACIER LAKE OVERFLOW: A CASE STUDY IN THE CORDILLERA BLANCA

La Importancia del Conocimiento Ecológico Tradicional para Comprender la Respuesta Espontánea de las Comunidades Andinas ante Incidentes de Desbordamiento de Lagunas Glaciares: Un Estudio de Caso en la Cordillera Blanca

Patricia J. Hammer¹

¹Center for Social Well Being, Carhuaz, Ancash

Abstract

The significance of the Andes for analysis of the devastation of Climate Change due to global human enterprises of war, industry and extractive mining is well demonstrated by science; however less known are the cultural responses of affected populations. While the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) meeting held in Quito, Ecuador in 2018 verifies the recognition of the importance of the region by scientists, minimal value is given to the centuries old wisdom, carefully constructed knowledge, as well as everyday practices of Quechua speaking peoples to interpret and interact their surroundings. Applied anthropology research on collective efforts to communicate, appease and reciprocate with the natural elements in ways that ensure plentiful harvests, needed water distribution and rain, all essential to the longevity of Andean culture and society can lend potential to comprehending the issue. The voices, experiences and specific intentions of Peruvian highland communities present a vital contribution to discussions of family and community health in socio-environmental contexts that propose efficacious means to mitigate and adapt to the unprecedented changing conditions of the world in which we live. Thousands of years dedicated to the care and nurturing of the nearly 90 delicate ecological niches present in Peru (Sociedad Peruana de Derecho Ambiental) by many different ethnic societies reverberates today in the thoughts, perceptions and response of such communities to conserve and revitalize both their natural and social environment. This article examines socio-environmental relations in the Peruvian Andes relevant for creating new paradigms of social dynamics, which motivate cohesion and concerted action that manifest in the face of ecological degradation globally.

Keywords: *Andean knowledge, natural and cultural resources, socio-environmental well-being, Peru*

Resumen

La importancia de los Andes para el análisis de la devastación del cambio climático debido a las empresas humanas globales de guerra, industria y minería extractiva está bien demostrada por la ciencia; sin embargo, menos conocidas son las respuestas culturales de las poblaciones afectadas. Si bien la reunión del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) celebrada en Quito, Ecuador en 2018 verifica el reconocimiento de la importancia de la región por parte de los científicos, se otorga un valor mínimo a la sabiduría centenaria, al conocimiento cuidadosamente construido, así como a las prácticas cotidianas de pueblos quechuahablantes para interpretar e interactuar con su entorno. La investigación de antropología aplicada sobre los esfuerzos colectivos para comunicarse, apaciguar y corresponder con los elementos naturales de manera que garanticen cosechas abundantes, la distribución necesaria del agua y la lluvia, todo ello esencial para la longevidad de la cultura y la sociedad andinas, puede brindar potencial para comprender el problema. Las voces, experiencias e intenciones específicas de las comunidades del altiplano peruano presentan una contribución vital a las discusiones sobre salud familiar y comunitaria en contextos socioambientales que proponen medios eficaces para mitigar y adaptarse a las condiciones cambiantes sin precedentes del mundo en el que vivimos. Miles de años dedicados al cuidado y fomento de los casi 90 delicados nichos ecológicos presentes en el Perú (Sociedad Peruana de Derecho Ambiental) por muchas sociedades étnicas diferentes reverberan hoy en los pensamientos, percepciones y respuestas de dichas comunidades para conservar y revitalizar tanto su ambiente y entorno social. Este artículo examina las relaciones socioambientales en los Andes peruanos relevantes para la creación de nuevos paradigmas de dinámica social, que motivan la cohesión y la acción concertada que se manifiestan frente a la degradación ecológica a nivel global.

Palabras clave: *Conocimiento andino, recursos naturales y culturales, bienestar socioambiental, Perú*

Introduction

All too often, projects of all kinds begin with the implementation of technological solutions, only to realize later that they have left out the very community who should benefit - if they ever do reach such a realization. It is sadly common to hear of “action plans” developed without stepping back initially and commencing early on with the necessary stage of **formative research** that employs *community participatory assessment instruments* where those affected by the issue may provide analyses based on their own experiences and perspectives to reach their own conclusions about risks and, together with external players, develop efficacious strategies. This article focuses on traditional environmental knowledge (TEK) that is composed of keen, careful, experience-based interpretations of human-environment relationships and their consequences (cf. Pelto, 1973). Applied anthropology methods of data collection and analyses in this regard can make a substantial contribution to build knowledge bases of TEK in indigenous intercultural universities worldwide as a fundamental resource in government and international project development. With regard to disaster management, it is clear that:

State organizations have *biopolitical discourses* and practices that consider local cultures irrelevant or irrational It is necessary to look at survivors not merely as affected people but as subjects with their cultures and coping strategies. Organizations must create opportunities for social recovery and not undermine the capacities of people to plan, decide, and externalize what is best for them. (Marchezini, 2015, 370; emphasis added)

It is crucial to examine hierarchies of knowledge to enrich our understandings of social and environmental contexts that enhance our concerted efforts to take appropriate actions in the face of emerging crises.



Figure 1. Avalanche from Hualcán glacier, Carhuaz, Peru. Photo: Dario Alva Diego, 2012.

The case presented here demonstrates the vitality of existing cultural values innate in the rapid response to mitigate potential human injury and death. To witness this event was like capturing a snapshot of the sudden avalanche (Figure 1). The immediate conscientious response by rural inhabitants expresses communal solidarity and an overriding concern for human safety, key to human-environment sustainability, the founding principles of social well-being.

Avalanche: April 11, 2010

Recently, the Peruvian National Glacier and Ecosystems Research Institute (INAIGEM - Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña) invited me as director of the Center for Social Well Being to present the analysis of a failed attempt to implement an Early Flood Alert Warning System (EWS) in a glacial lake at the base of Mt. Hualcán that empties into the Chucchun river basin in the Cordillera Blanca, one of the highest tropical mountain ranges on the planet (Hammer, 2021). Our research and training center is located along that river on an ecological farm above the town of Carhuaz. In response to deglaciation, INAIGEM is currently in the process of implementation of similar alert systems in two other basins in the Callejón de Huaylas (i.e., Caraz and Huaraz).

The following case is composed of several linked incidents:

- 1) 2010 - An avalanche caused a glacial lake overflow (GLOF)
 - a. Spontaneous collective response that averted casualties
- 2) 2011-15 Implementation of an EWS (Early Warning System) by the University of Zurich and CARE with the local municipality (“Proyecto Glaciares”)
- 3) 2016 Organized rural citizens’ removal of the scientific monitor from the lake

One Sunday morning in April 2010, as I prepared breakfast at our home, ranch and research center, co-director Pocha Barreto called me out to the garden where we heard a terrible roaring sound akin to a locomotive train, similar to tornado groans familiar from my childhood in the Midwest United States. At the same time, we heard *voices* piercing the roar, shouting to warn people to “stay away from the river!” With juice in hand and faithful dogs at our side, we started to flee up the hillside away from the river, our heads filled with images of previous known avalanches, such as Yungay in 1970 (Oliver-Smith, 1979). Being Sunday, most neighbors had earlier gone down to market in the town of Carhuaz, which is 1.5 km and 400 meters below us at an elevation of 2638 meters above sea level. As we ascended to ensure our safety, we met a couple of elderly neighbors tending crops who paused to greet us, not at all concerned with what seemed to us

a pending disaster. Semi-embarrassed we inquired about the deafening noise. “Oh, that always happens this time of year with all the rains, you know. Enjoy your hike!” Both octogenarians, born in the area, had been present and survived the 1970 severe earthquake that decimated the nearby town of Yungay. Their composure compelled us to return to our land where several families were escaping from the river on the ranch’s southern border, protected by forest. The incident provoked panic in urban Carhuaz, since it was obvious that the municipality had no disaster response plan. The mayor delivered contradictory announcements – first denying any cause for worry, and quickly afterwards declaring a state of emergency. However, people were immediately calmed down where we were in the countryside, as the raging river began to subside. In the end, no one was injured and property damage was minimal.

Reports from local water authorities confirm that the lake overflow was caused by an avalanche of ice and rock debris into the lake (known by scientists as Lake 513, or Laguna 513 in Peru) just above Pampa Shonquil in the high *puna*¹ at the base of the Hualcán glacier (5500 m a.s.l.). It was confirmed that ducts installed in 1991 at the lake to release pressure from just such occurrences had functioned correctly, dissipating the force of the water and considerably mitigating impact down valley. The incident was classified as “mild” by Peruvian geologic and glacial institutes (Valderrama and Vilca, 2012).

Despite the fact that ill effects were minimal, the mayor and municipality thrived on the national and international attention the event attracted, opening the door for financial and technical support. From 2011 to 2015, the University of Zurich and the US-based NGO CARE introduced a pilot project to the Municipality of Carhuaz (funded by COSUDE – Swiss Institute for International Development and Cooperation) for an early flood alert system. It included installing alarms in neighborhoods near the river (that never worked properly, sounding at any time day or night, and were eventually removed), signs posted in Spanish with arrows indicating where to run up the hill in case of flash flood, and a map of escape routes in the town hall. A flood sensor was installed at Lake 513 and “emergency response protocols were developed”. According to the project report:

“From 2011 to 2015, a multidisciplinary project for sustainable reduction of climate change-related risk in high mountains was **accomplished**: “Glaciares 513 – Adapting to climate change and reducing disaster risks due to receding Andes glaciers”. Within the context of this project, an operational EWS [Early Warning System] against GLOFs [Glacier Lake Outburst Floods] was designed and implemented at Laguna 513, and the **necessary emergency response protocols were developed**.” (Fluixa-Sanmartin et al., 2016; emphasis added)

Surprisingly, what is omitted from the professionals’ analyses, discourse, plans and actions is the prioritization

of appropriate integration of the communities who manage on a daily basis, as well as for decades throughout their lifetimes, the communal lands where the glacial lakes are found, into their disaster prevention project. For example, some academics have defined that “facilitating factors are **technical capacity, disaster events with visible hazards, institutional support, committed individuals, and international involvement**” (Carey et al., 2012; emphasis added).

However, a crucial *facilitating factor* that should be considered is the involvement, engagement, labor and time intensive commitment toward community capacity building both to better understand the risk situation from the point of view of everyday Quechua-speaking inhabitants and also to ensure the potential sustainability of the project over the long term. The primary project document designates the lake overflow incident as – “An event that **proves** an existing risk...” (Haeberli et al., 2016). However, they fail to acknowledge that it also proves the capacities of local people to respond spontaneously and effectively to avoid accidents and death, which would be an excellent point of departure to strengthen community assets in such mountain environments.

A vital element in the spontaneous citizen response is the traditional use of *call points* along the river. The moment the ice fell into Lake 513, the municipal, appointed water guard stationed in the high *puna*, Pampa Shonquil (see Figure 2), reported the occurrence to officials by cell phone. He then proceeded to descend the mountain, alerting locals as he went, which began the spontaneous shouts and whistles from the strategic call points on both sides of the river Chucchun. Over the raging river, we could hear the clear whistles and voice calls of people warning from the south bank to stay away from the river’s edge. Local inhabitants refer to our location on the river’s north bank as *Cashamarca*², which corresponds with the call point directly across the river known as *Qeshqipachan*³. That point is a traditional viewpoint and resting spot, known as *samay*⁴ throughout the Andes. When ritual processions descend from the high altitude communities, it is a place designated to take a break, rest, play music, dance, chew coca and drink *chicha*⁵ in honor of the strategic location, as well as to ensure the well-being and prosperity of their collective effort. These commonly known communication points are distributed from the high plateau above the communities, Pariacaca and Hualcán, and dispersed in descent along the basin that joins with the Santa River, which runs the entire length of the Callejón de Huaylas (200 km). The call points are used by community appointed “*vocales*” who are responsible to call meetings, warn of *abigeos*⁴ (animal thieves) escaping along the river, and advise of just such avalanche and flood dangers as this event.

How Common Are Avalanches?

Local farmers who frequent the high *puna* agree that depending on the season, temperature, clouds, rain and



Figure 2. Pampa de Shonquil, Carhuaz. Photo: Dario Alva Diego, 2012.

other meteorological factors, landslides and avalanches of differing degrees are not uncommon. In fact, they explain that there are actually three lakes at the glacier's base, one of which is named *Raju Paquinan*, which means "where the ice breaks". Therefore, although there was no specific forewarning of the event, locals responded quickly and adequately despite the sudden onset of the overflow, and were not taken completely by surprise. They seemed to know exactly what to do. According to the water authority's report, there were no human casualties, no injuries and the occurrence did not directly affect the urban center below. A consideration of this collective spontaneous emergency effort would have been ideal, initially, for developing a replicable model to mitigate potential damage as well as to strengthen community response in an integrated way throughout Carhuaz province and other similar river basins in the valley. The identification of cases of exceptional positive behavior, attitudes and social action to promote health and minimize environmental threats is common practice in medical anthropology and international health research, referred to as *positive deviance* (Zeitlin et al., 1990), and has been applied to examine, for example, effective traditional cultural responses to obstetric emergencies. Rather than solely focusing on tragic incidents, one identifies successful cases of spontaneous family and social network response to obstetric emergencies as a positive example of potential problem solving. Unfortunately, the glacier intervention project omitted a preliminary exploration of both recent and long-term history of the reactions of local inhabitants to seasonal mountain accidents.

It is apparent that project professionals were highly aware of possible resistance to their efforts: "Another challenge of the project is the aversion of certain local people against technical, particularly

meteorological and climatological installations" (Huggel et al., 2012). Although project personnel were aware of mutual distrust they failed to bravely address it. While the description of the well-intentioned project proclaims to provide a "multidisciplinary" approach, this missed opportunity to explore why "certain people" may be suspicious of outsiders' technology is a grave omission that bore significant consequences (an early warning sign of imminent project disaster).

In the mid-1980s, I was carrying out my first fieldwork in the neighboring Quebrada Ulta as an undergraduate anthropology student. Occasionally, foreign hikers would pass through to climb Mt. Huascarán, Peru's highest mountain peak, or to visit the glacial Lake Auquiscocha. Locals revealed to me their mistrust of such visitors, and remarked that they were concerned that "gringos" go up to the lake and put something in it to interfere purposely with rainfall. While I pondered about how people arrived at such accusations, it occurred to me that, actually, it is easy to see how highland farmers would question the intentions of foreigners in their territory from their concrete experiences of many centuries of domination by outsiders with interests detrimental to their way of life. Therefore, this suspicion that outsiders may interfere with rainfall is by no means new.

Community Organized Action

November 24, 2016, an extraordinary event took place in Carhuaz. Distressed by six months of drought, a consortium of highland authorities and community members arrived at the conclusion that the much-needed precipitation was being impeded by an Early Flood Warning device installed by international researchers. The mobilized citizen group ascended to the glacial

lake within their communal territory and removed the apparatus, after which the seasonal rains began torrentially. This event troubled scientists with invested interests in this and other related technological projects both in the Cordillera Blanca and Negra (Klimeš and Vilímek, 2011), worried that the positive result of the concerted public demonstration could trigger other such efforts and would serve to confirm suspicions of the impediments to rainfall caused by technical interventions.

If the *Proyecto Glaciares* had taken the time and made the effort to consider Andean cultural practices related to water and rainfall, they would have perceived the mounting tension of the local rural population in a year of progressively severe drought. A recent scientific publication details the 2010 Lake 513 “disaster,” subsequent intervention, as well as installation of the supposedly successful Early Warning System in glacier lakes of Palcacocha (Huaraz, Ancash) and Chicón (Urubamba, Cuzco). The article places blame on “intra and inter-community conflicts” as well as other sociocultural factors as elements that led to the dismantling of the monitor in Carhuaz, and makes a plea for the recognition and acknowledgment of “traditional knowledge and narratives” (Huggel et al., 2020). The following analysis is a response to this call for dialogue among the sciences - social and otherwise.

Andean agricultural calendar systems include observances of the cosmos and other natural phenomena to guide human productive decisions and behavior. One example is the June solstice dawn observance of the rise of the constellation the Pleiades (*Qolca* in Quechua) in relation to the position of Venus (*Chaska* in Quechua) to predict whether there will be sufficient rain for the coming agricultural year (Urton, 1981). Not simply a folkloric tradition, these steadfast Andean observances are found to correlate with atmospheric markers to foresee the expected quality of precipitation in the forthcoming months (Orlove et al., 2002).

In the annual cycle, to ensure favorable outcomes, concrete observances necessarily require human group involvement and coordination, as in the June solstice celebrations of Inti Raymi in Cuzco and San Juan in the district of Shilla, Carhuaz. As recorded in the Spanish chronicles, the September equinox was observed in anticipation of the desired seasonal rains. “One of the fiestas, *Coya Raymi*, took place during the September equinox and coincided with the arrival of the first [annual] rains” (Molina, 1552, cited in Rostworoski, 2015; translated by P. H.).⁷

Carhuaz’s most important *fiesta* takes place at the September equinox, now known in its Catholic guise as *La Virgen de las Mercedes*, affectionately called “Mama Mechi”. Sequential patron saint fiestas follow the Equinox, both in time (September through November) and space - from the Plaza of Carhuaz at the valley floor, ascending through the small communities along the river

Chucchun basin, up to the community closest to the high *puna*, Pariacaca – named for the Inca deity of thunder and lightning. The correlation between anticipating the rains and the lunar cycles from the September equinox onward is illustrated by the 17th century chronicler Guaman Poma, who describes October as *Uma Raymi*, the month of water festivity. “In October, when the plants require water to grow, they tied a black llama to a post in the plaza and made it cry, asking for the rains” (cited in Zuidema, 2015; translated by P. H.).⁸

In a recent report in INAIGEM’s weekly forum, Dr. Silva Vidal (2021) presented results from a decade of precipitation research in the Mantaro Valley of the Central Andes, which provides a register of annual rains that usually commence between the nineteenth and twenty-third of September, just at the equinox.

Socio-Ritual Action to Ensure Well-Being

The *puna* is the quintessential communal land, place, and environment where shared productive activities take place, access to communal resources is assured, and where there is an absence of individual private property. In the Andes, myths persist that identify the lakes of the high *puna* with the origin of earthly beings, particularly camelids, who thrive and are herded there. Spanish chronicles provide many references to the sacrifice of llamas, especially at the September equinox, to call the rains. Pampa Shonquil above Carhuaz is communal land where animals are allowed to graze freely (Figure 3). The pampa provides evidence of long-time human occupation – there are unexcavated archaeological remains that may be tombs and *qolcas* (stone storage structures for preserving freeze-dried tubers, meat, etc.; Tagle, 2021, 20), as well as a sight point known as *Inti Watana*⁹, that by its name infers a solar observation point (Figure 4). For local farmers, the pampa is a familiar, domesticated realm, easily accessible for the gathering of medicinal plants and for pasturing animals. It is significant to note that the Quechua term for the constellation Pleiades is *Qolca*, which includes the meaning of food security due to plentiful harvest. For this reason, the constellation is closely observed during the June solstice, bearing a variety of interpretations throughout the Andes (Orlove et al., 2002) to anticipate adequate rainfall for crops. This understanding of the *puna* differs greatly from scientists who view the high *puna* as remote, hostile and savage, as expressed in this report: “In Carhuaz, the preparatory phase has been finished and technical and logistical problems concerning the implementation of the system in **hardly accessible high mountain environments** are to be solved” (Huggel et al., 2012; emphasis added).

It is important to consider the removal of the scientific monitor from the glacial lake as a socio-ritual act performed to ensure comprehensive well-being by the participating community members. By November of 2016, despite the completion of ceremonial and social obligations throughout Carhuaz, the fierce drought was

relentless. Earlier in the year, communal authorities had requested the town municipality to remove the sensors from the lake, but to no avail. That was when a well planned and organized group of community authorities

advised the mayor of their intentions, ascended to the lake and removed the equipment, with the mayor present (<https://www.youtube.com/watch?v=YUTKqS29nbk>).



Figure 3. La puna – communal land. Photo: Dario Alva Diego, 2012.

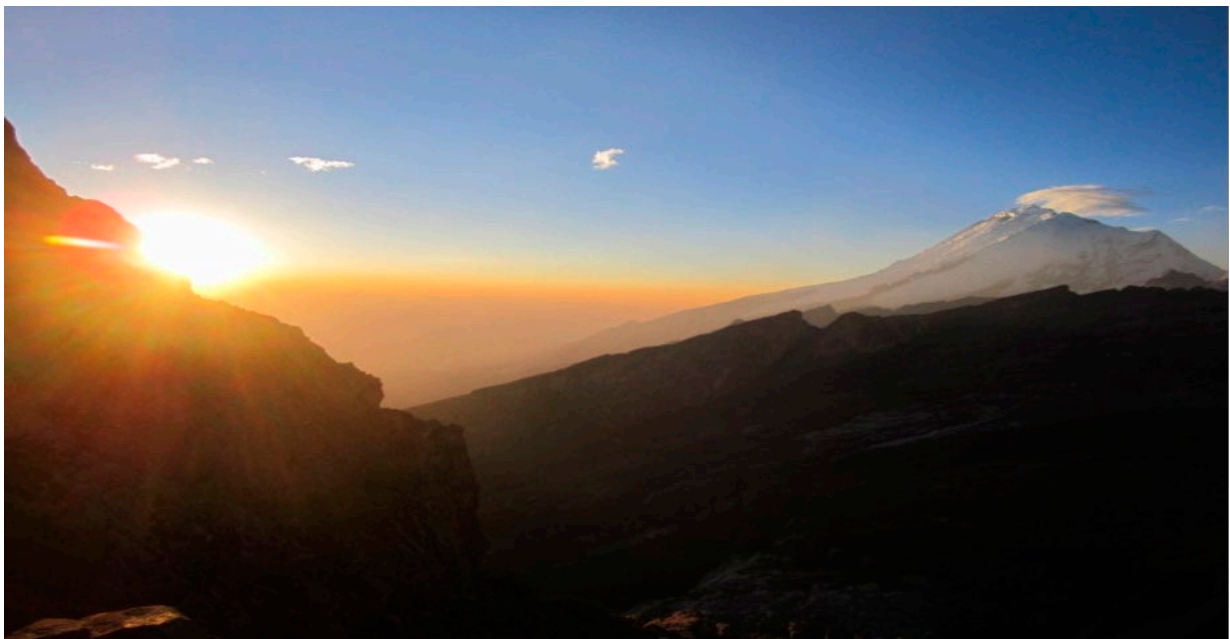


Figure 4. Inti Watana. Photo: Dario Alva Diego, 2012.

Briefly, it is important to mention that Carhuaz maintains a dual political system made up of, on the one hand, elected and appointed officials at district and community levels and, on the other hand, the centuries-old traditional system of *varayoc*¹⁰. The role of *varayoc* is a rotating annual *cargo* that community couples are obliged to assume once in their lifetime, with priority concerns for the communal care of water. In this context, Carhuaz is organized into two moieties: *Rupash* (where the sun rises, literally “gets hot”) located in the Cordillera Blanca and *Ekash* (where the sun goes down) in the Cordillera Negra, west across the Santa River. The concern for the drought, perceived to be related to the sensor in the lake, was felt both by the irrigation-dependent communities of the Quebrada Hualcán in the Cordillera Blanca (*Rupash*), as well as those from the rain-dependent hills of the Cordillera Negra (*Ekash*). It was the recognized authorities, officially registered in the municipality, who performed the collective action, which closely resembles ancestral ceremonies to beckon the rains, as observed and recorded in the 17th century: “Processions were organized whereby participants, playing drums and producing shouts of war, tried to scare away the drought . . .” (Murra, 1968, 61; translated by P. H.).¹¹

Andean rituals to beckon rain are performed with a certain composition of participants, in designated contexts and environments, at particular moments *propitious for precipitation*. Anticipation of annual rainfall, beginning with the June solstice observation of the rising of Venus in correlation with the position of the Pleiades, followed by the mounting tension due to lack of rain after the September equinox and subsequent October community celebrations, contributed to the removal of the electronic lake level monitor, as late November showed initial signs of pending rains. The Quechua term *illa* refers to locally recognized indicators associated with the earth (plants, animals, birds, insects, etc.; cf. Walter, 2018), the atmosphere (wind, clouds, humidity/dryness, moon phases, barometric pressure, etc.; cf. Baulenas i Pubill, 2016), and spheres of human interactions - shared stress, anxiety, worry, fear about the consequences of drought. Such signs inform collective analyses, decision-making and concerted action.

In the case of the Hualcán glacier lakes above Pampa Shonquil, the unaddressed tensions between urban/rural objectives, uses, management and relationships with water, as well as the immense gap between academic scientific vs. local rural Andean interpretations of glacial disaster risks and development of appropriate prevention systems, contributed to the failure of the international, academic, scientifically-based intervention.

Lessons learned include the simple requirement to *begin at the beginning*. It is essential to initiate socio-environmental investigations that seek to understand the effects of deglaciation on highland lakes in inclusive contexts of group participatory reflection and analysis sessions with community members who inhabit and frequent the high *puna* that is within their communal

territory throughout their lifetimes and ancestrally for centuries.

Now, in the third decade of the 21st century, is an opportunity to bring forth the innovative methods and analyses developed in Applied Anthropology, particularly **Community Participatory Action Research** (cf. Fals Borda, 1986) that motivates collective reflection, analysis and praxis to work towards a reformulation of our multifaceted conceptualization of ecology, in order to nurture a more just society in balance with the delicate environment which we contemporarily share.

Notes

¹ *puna* – Quechua term (also employed in Peruvian Spanish) for “high Andean plateau, above the tree line”.

² Cashamarca – Quechua toponym that literally means “the place of thorn bushes,” from *casha* meaning “thornbush” and *marca* meaning “a place of residence”.

³ Qeshqipachan – Quechua toponym that literally means “the place where the thistle grows on the hillside”, from *qeshqi* referring to a variety of thistle and *pachan* designating an ascent up the mountain.

⁴ *samay* – Quechua term for a traditional ritual resting spot; *samay* literally means breath.

⁵ *chicha* – Spanish for “maize beer”.

⁶ *abigeos* – Spanish for “cattle rustlers”.

⁷ *Una de las fiestas, Coya Raymi, tenía lugar durante el equinoccio de setiembre y coincidía con la llegada de las primeras lluvias* (Molina, 1552; cited in Rostworoski, 2016).

⁸ *En octubre, cuando las plantas requieren agua para crecer, se ataba una llama negra a un poste en la plaza y se la obligaba a que llorara pidiendo lluvias* (cited in Zuidema, 2015)

⁹ *Inti Watana* – Quechua term derived from *inti* meaning “sun” and *watana* meaning “window”.

¹⁰ *varayoc* – Quechua term for a traditional, community-elected authority. Believed to derive from the Spanish *vara*, which refers to a staff of office. In Carhuaz, there is the inference that it refers to the prehispanic organization of populations into *waranqas*, groups of approximately 1000 members, the *warayoc* being the communal representative.

¹¹ *Se organizaban procesiones en que los participantes armados tocaban tambores y lanzaban gritos de guerra para espantar la sequía...* (Murra, 1968, 61).

Acknowledgements

All photo credits go to Dario Alva Diego, mountain guide, Carhuaz, Ancash, Peru. Also, my appreciation to Samuel Hulsey for locating this source: “Alcalde provincial sobre el SAT en Laguna 513” <https://www.youtube.com/watch?v=YUTKqS29nbk>.

References

- Baulenas i Pubill, A. (2016). *La divinidad Illapa: Poder y religión en el imperio Inca*. Arequipa, El Lector.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haerberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3-4), 733-767.
- Fals Borda, O. (1986). La investigación-acción participativa: Política y epistemología. In Camacho, A. (Comp.), *La Colombia de hoy: Sociología y sociedad*, 21-38. Bogotá, Fondo Editorial CEREC.
- Fluixa-Sanmartin, J., García Hernández, J., Huggel, C., Frey, H., Cochachin Rapré, A., Gonzales Alfaro, C. A., Meza Román, L. and Masías Chacón, P. A. (2016). Highlights and lessons from the implementation of an early warning system for glacial lake outburst floods in Carhuaz, Peru. ["Proyecto Glaciares", funded by the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), executed by CARE Peru, the University of Zurich, CREALP, Meteodat, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL).] 2016 International Tec4Dev Conference.
- Haerberli, W., Huggel, C., García-Hernández, J. and Guillén, S. (2016). *Proyectos multipropósito en recursos hídricos en la alta montaña. Un documento orientador*. ["Proyecto Glaciares", Carhuaz, Peru]. Lima, COSUDE, University of Zurich, CARE.
- Hammer, P. (2021, July 2). *Análisis de la Acción Colectiva: Hacia una comprensión de conflictos sociales* [Powerpoint presentation]. Viernes Científicos, INAIGEM, Huaraz. <https://www.facebook.com/InaigemPeru/videos/888143765112079/>
- Huggel, C., Cochachin, A., Frey, H., García, J., Giráldez, C., Gómez, J., Haerberli, W., Ludeña, S., Portocarrero, C., Price, K., Rohrer, M., Salzmann, N., Schleiss, A., Schneider, D. and Silvestre, E. (2012). Integrated assessment of high mountain hazards, related risk reduction and climate change adaptation strategies in the Peruvian Cordilleras. *Proceedings of the 4th International Disaster and Risk Conference: Integrative Risk Management in a Changing World – Pathways to a Resilient Society, IDRC Davos 2012*, 329-332. Davos, Switzerland, IDRC.
- Huggel, C., Cochachin, A., Drenkhan, F., Fluixá-Sanmartín, J., Frey, H., García Hernández, J., Jurt, C., Muñoz, R., Price, K. and Vicuña, L. (2020). Glacial Lake 513, Peru: Lessons for early warning service development. *World Meteorological Organization Bulletin* 69(1). www.researchgate.net/publication/340451965
- Klimeš, J. and Vilímek, V. (2011). A catastrophic landslide near Rampac Grande in the Cordillera Negra, northern Peru. *Landslides*, 8, 309–320.
- Marchezini, V. (2015). The biopolitics of disaster: Power, discourses and practices. *Human Organization*, 74(4), 362-372.
- Murra, J. (1968). La papa, el maíz y ritos agrícolas del Tawantinsuyu. *Amaru*, 8, 58-62. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Oliver-Smith, A. (1979). The Yungay avalanche of 1970: Anthropological perspectives on disaster and social change. *Disasters*, 3(1), 95-101.
- Orlove, B. S., Chiang, J. C. H. and Cane, M. A. (2002). Ethnoclimatology in the Andes. A cross-disciplinary study uncovers a scientific basis for the scheme Andean potato farmers traditionally use to predict the coming rains. *American Scientist*, 90, 428-435.
- Pelto, P. J. (1973). *The snowmobile revolution: Technology and social change in the Arctic*. Menlo Park, California, Cummings Publishing.
- Rostworoski, M. (2015). *Mujeres y poder en los Andes coloniales*. Lima, Instituto de Estudios Peruanos.
- Silva Vidal, Y. (2021, June 25). *Cambios en la estacionalidad de las lluvias en los Andes peruanos* [Powerpoint presentation]. Viernes Científicos, INAIGEM, Huaraz. <https://web.facebook.com/InaigemPeru/videos/619698689422467>
- Tagle, I. L. (2021, 4 setiembre). Qolca: Almacén milenario. *Revista Somos*, El Comercio. Lima.
- Urton, G. (1981). *At the crossroads of the earth and the sky: An Andean cosmology*. Austin, University of Texas.
- Valderrama, P. and Vilca, O. (2012). Dinámica e implicancias del aluvión de la laguna 513, Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Revista de la Asociación Geológica de Argentina*, 69(3), 400-406. Buenos Aires.
- Walter, D. (2018). Traditional meteorological perceptions and ritual practices in the Callejón de Huaylas (Ancash, Peru). XXXVI International Congress of the Latin American Studies Association, May 23-26, 2018, Barcelona, Spain.
- Zeitlin, M. F., Ghassemi, H. and Mansour, M. (1990). *Positive deviance in child nutrition – with emphasis on psychosocial and behavioral aspects and implications for development*. New York, United Nations University Press.
- Zuidema, T. (2015). *Códigos del tiempo. Espacios rituales en el mundo andino*. Lima, Apus Graph.

DISTRIBUTION AND HYDROLOGICAL FUNCTION OF LAND COVER TYPES IN THE SHULLCAS WATERSHED, PERUVIAN ANDES

Distribución y Función Hidrológica de los Tipos de Cobertura Terrestre en la Cuenca Shullcas, Andes Peruanos

Morgan Sadler¹, Lauren D. Somers², Jeffrey M. McKenzie¹, Bryan G. Mark³, Pablo Lagos⁴ and Michel Baraer⁵

¹McGill University, Department of Earth and Planetary Sciences, Montréal, Quebec, Canada

²Dalhousie University, Civil and Resource Engineering, Halifax, Nova Scotia, Canada

³Byrd Polar and Climate Research Center, The Ohio State University, Department of Geography, Columbus, Ohio, USA

⁴Instituto Geofísico del Perú, Lima

⁵École de Technologie Supérieure, Département de génie de la construction, Montréal, Québec, Canada

Abstract

Tropical Andean watersheds face declining dry season streamflow as the climate warms and high-mountain glaciers recede. Concurrently, the relative importance of groundwater discharge increases, driving the need to better understand groundwater dynamics in tropical alpine settings. Various alpine landforms have been suggested as important groundwater reservoirs including talus slopes, moraines, wetlands and bedrock. However, the relative importance of different landforms at the watershed scale remains unclear. We use satellite imagery and a terrain model to classify land cover in the Shullcas watershed in the Peruvian Andes. We then combine the classification results with one-dimensional soil water flow models using HYDRUS-1D, representing different land cover types, to elucidate the prevalence and hydrologic function of the land cover classes. Results show that grasslands and grassy hillslopes are particularly important in recharging groundwater and feeding streamflow since they cover the largest proportion of the watershed (71%). Per unit area, grassy hillslopes and talus are the largest contributors to dry season streamflow or deeper groundwater. Wetlands cover a small portion of the watershed (7%) but represent a disproportionately large amount of the near-surface water storage (17%) and show more resilience to changes in temperature and precipitation regime. Our approach can be used to better understand the groundwater dynamics of different mountain land cover types which are shifting in the Andes, in response to climate change and human activity.

Keywords: *Andes, hydrology, HYDRUS-1D, groundwater, land cover classification*

Resumen

Las cuencas hidrográficas andinas tropicales se enfrentan a un flujo descendente de la estación seca a medida que el clima se calienta y los glaciares tropicales retroceden. Mientras tanto, la importancia relativa de la descarga de agua subterránea aumenta, lo que impulsa la necesidad de comprender mejor la dinámica del agua subterránea en entornos alpinos tropicales. Se han sugerido varios accidentes geográficos alpinos como reservorios importantes de aguas subterráneas que incluyen: taludes, morrenas, humedales y lechos de roca. Sin embargo, la importancia relativa de los diferentes accidentes geográficos a escala de cuenca sigue siendo poco clara. Utilizamos imágenes satelitales y un modelo de terreno para clasificar la cobertura terrestre en la cuenca de Shullcas en los Andes peruanos. Luego combinamos los resultados de la clasificación con modelos unidimensionales de flujo de agua del suelo usando HYDRUS-1D, que representan diferentes tipos de cobertura terrestre, para dilucidar la prevalencia y la función hidrológica de las clases de cobertura terrestre. Los resultados muestran que las laderas cubiertas de hierba y los perfiles de roca son los principales contribuyentes al flujo de la estación seca o al agua subterránea más profunda, por unidad de área. Además, los pastizales y las laderas cubiertas de hierba son particularmente importantes ya que cubren la mayoría de la cuenca (71%). Los humedales cubren solo una pequeña porción de la cuenca (7%), pero representan una cantidad desproporcionadamente grande de almacenamiento de agua cerca de la superficie (17%) y muestran más resistencia a los cambios en la temperatura y el régimen de precipitación. Nuestro enfoque novedoso se puede utilizar para comprender mejor la dinámica de las aguas subterráneas de los diferentes tipos de cubierta terrestre de montaña que están cambiando en los Andes, en respuesta al cambio climático y la actividad humana.

Palabras clave: *Andes, hidrología, HYDRUS-1D, agua subterránea, clasificación de la cubierta terrestre*

Introduction

Mountain areas provide essential water supply for much of the world's population. However, future water availability derived from these regions is threatened by the loss of ice and snow caused by climate warming (Barnett et al., 2005; Viviroli et al., 2007). This effect is especially severe in high-altitude tropical mountain ranges, where the rate of warming is greater than at lower elevations (Bradley et al., 2006; Pepin et al., 2015). For example, the Peruvian Andes are home to 70% of the world's tropical glaciers but lost 43% of their glacierized area between 1970 and 2014 (UGRH, 2014). In the tropical Andes, glaciers act as a hydrologic buffer, providing sustained meltwater inputs during both rainy and dry seasons. As glacier melt declines, so does dry season streamflow, exacerbating annual water shortages for downstream communities, cities and industries (Bury et al., 2013; Mark et al., 2017).

However, mountain streamflow is also fed by groundwater (Somers and McKenzie, 2020; Glas et al., 2018 and references therein), and as glaciers recede, dry season streamflow in the Andes becomes increasingly dependent on groundwater discharge. Baraer et al. (2015) estimate that 24-80% of dry-season streamflow is derived from groundwater in four proglacial rivers of Peru's Cordillera Blanca. They also show that relative groundwater contribution is higher for watersheds with less glacier coverage. Groundwater is also an important streamflow contributor elsewhere in the Peruvian Andes (Crumley, 2015; Somers et al., 2019) and Ecuadorian Andes (Saberli et al., 2019). Though groundwater is understood to contribute substantially to mountain streamflow globally, there is little consensus on the relative importance of different groundwater stores and pathways. Coarse geomorphic units like talus slopes, moraines and alluvial deposits have been shown to store and transmit groundwater in mountains (Clow et al., 2003; Gordon et al., 2015; Hayashi, 2020; Hood et al., 2006; Käser and Hunkeler, 2016). Other studies have focused on the role of mountain wetlands and grasslands in storing groundwater and slowing the transmission of precipitation to streamflow (Buytaert and Beven, 2011; Mosquera et al., 2015). Still others have stressed the importance of distributed recharge that reaches mountain streams via bedrock aquifers (Frisbee et al., 2011; Kosugi et al., 2006). Furthermore, the relative importance of different landscape features in storing and transmitting groundwater depends on their spatial coverage, which, in turn, is influenced by the scale of the study. For example, wetlands or talus slopes may be important groundwater reservoirs but how important are they if they occupy only a small portion of the watershed area?

The hydrological system of the Peruvian Andes is different than that of mid- and high-latitude glacierized mountains because there is no significant seasonal snowpack accumulation outside glacierized areas. Therefore, hydrological studies from other mountain ranges are not always transferable. Previous groundwater

studies in the Peruvian Andes have shown that coarse slope deposits (like talus) and moraines tend to act as conduits for groundwater recharge, which is often upwelled and exfiltrated in mid-valley wetlands and springs (Caballero et al., 2002; Gordon et al., 2015; Somers et al., 2016). These Andean wetlands are known as bofedales (or sometimes pampas) and share some similarities with the páramos of the northern Andes, which are known for their excellent water regulation capacity (Buytaert and Beven, 2011). In some areas of the Peruvian Andes, herding communities may actively manage bofedales using canals to expand wetland area (Verzija and Quispe, 2013).

Given the increasing importance of mountain groundwater and land cover changes that may accompany climate change, a better understanding of the water storage properties of different land cover types would provide an important tool for evaluating the vulnerability of different watersheds and the water resources that they provide to downstream communities. Additionally, social and economic factors affect water resource availability in the Andes (e.g., Carey et al., 2014) and, in some situations, increased water demand may be a larger stress on water resources than decreases in water availability due to climate change (Young et al., 2017). Furthermore, much of the published proglacial hydrological research in Peru has focused on the Cordillera Blanca. Smaller glacierized ranges, like the Cordillera Huaytapallana, have received relatively little attention despite the heightened threat of climate change for lower elevation tropical glaciers, and the importance in providing streamflow to nearby cities.

The objectives of this study are to (1) quantify the distribution of land cover types in an under-studied proglacial tropical Andean watershed, (2) elucidate the hydrologic function of the different land cover types and their sensitivity to different climate inputs, and (3) estimate the relative importance of different land cover types in storing and transmitting groundwater and soil moisture in the watershed overall. To achieve these objectives, we use satellite imagery and a digital elevation model (DEM) to perform a supervised classification of land cover types and associated geomorphic units in the Shullcas watershed in central Peru. We then employ a one-dimensional saturated and unsaturated groundwater flow model (HYDRUS-1D), along with field observations, to simulate infiltration, storage, and transmission of water through the shallow subsurface of each land cover type. We use sensitivity analysis to quantify the uncertainty of these models and investigate the impact of climate change. Finally, we combine our understanding of spatial prevalence and hydrological functioning to suggest which land cover types are critical for shallow groundwater/soil water storage and for feeding dry-season streamflow.

Methods

Study Area

Our study focuses on the Shullcas watershed located in the Cordillera Huaytapallana, Peru, a proglacial mountain chain located approximately 300 km east of Lima (Figure 1). The Shullcas River drains part of the Huaytapallana glacier system before flowing into the Mantaro River, an Amazon tributary. Average annual precipitation is roughly 800 mm per year and increases with elevation (ANA, 2010). Precipitation is highly seasonal in this region while temperature remains relatively constant throughout the year. Most of the annual precipitation occurs during the rainy season between October and April (López-Moreno et al., 2014).

Between 1984 and 2011, the area of the Huaytapallana glaciers declined by 44% (López-Moreno et al., 2014), raising concerns about dry season water supply. The nearby city of Huancayo (population of 365,000 in 2015) receives approximately 60% of its drinking water from the Shullcas River and already experiences frequent water shortages during the dry season (Mark et al., 2017). Crumley (2015) used a hydrochemistry approach to estimate that 9-17% of the Shullcas River dry-season discharge was derived from glacial meltwater and that the remainder was from groundwater in 2014. The city of Huancayo operates small dams on some of the high-elevation lakes in the watershed to mitigate dry-season water shortages. In addition to the Huancayo water supply, the Shullcas watershed includes the community of Acopalca and is home to llama and alpaca herding operations, as well as trout farming by local community members. The Huaytapallana peak (Nevado Huaytapallana) is also a site of spiritual importance for locals and is a tourist destination.

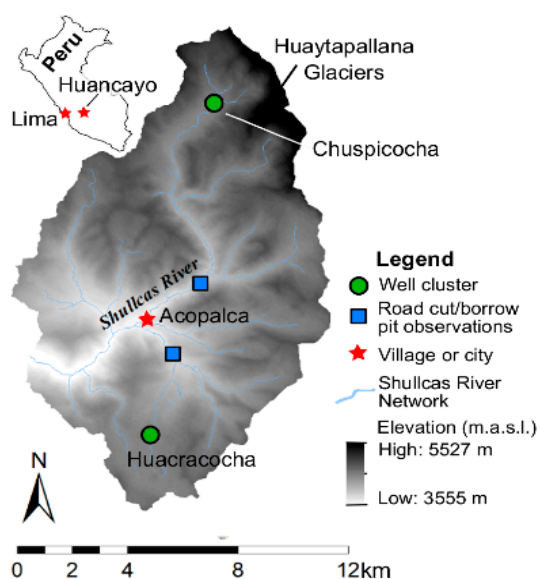


Figure 1. Map of the Shullcas watershed including topography, the location of field observations and location within Peru (inset).

The Shullcas watershed ranges in elevation from 3628 to 5557 meters above sea level (m a.s.l.) and is in the central Andean puna ecoregion (Dinerstein et al., 1995). Land cover mostly consists of steep alpine grasslands dominated by *Stipa ichu* tussock grass with bedrock outcropping at mid-high elevations and glaciers at the highest elevations. *Bofedal* wetlands occur in valley bottoms and near small lakes, as they do elsewhere in Peru (Maldonado Fonkén, 2014/2015, Salvador et al., 2014/2015). These wetlands consist of low-gradient hummocky peatlands with an abundance of cushion-forming vegetation species such as *Distichia muscoides*, as well as other plants including *Plantago rigida*, and *Stipa ichu* (Salvador et al., 2014/2015).

Land Cover Classification

Six land cover classes were selected to capture the full range of near-surface hydrological characteristics. The selection was based on several field visits, examination of satellite imagery and in-depth discussion among coauthors. The classes include wetland, grassland, grassy hillslope, rock, glacier and water. The rock class represents both outcropping bedrock and talus slopes given the difficulty of distinguishing between the two based on coarse satellite imagery. A shadow class was also added to identify areas with insufficient illumination for classification.

Satellite imagery was collected by the Landsat-8 Operational Land Imager with 30 m² spatial resolution (USGS, 2017). The Landsat imagery was acquired on August 7, 2017 and was the most recent cloud-free surface reflectance image available at the time of analysis. The DEM was taken from the ASTER GDEM – Version 2, which also has a 30 m² spatial resolution and was released in October 2011 (Tachikawa et al., 2011). Both the Landsat Imagery and ASTER GDEM were accessed through the *EarthExplorer* portal (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). The Landsat image was calibrated to surface reflectance by the USGS prior to download, wherein raw digital numbers were converted to top-of-atmosphere reflectance and the data was corrected for atmospheric effects (USGS, 2019).

We applied a Minnaert topographic correction (Smith et al., 1980), with a coefficient of 0.5, to the Landsat imagery to correct for the effect of variation in slope, aspect and elevation on surface reflectance. We then selected band numbers 2 to 7, ranging from 0.450 to 2.29 μm, for analysis. We converted the DEM to a topographic position index (TPI) calculated as the difference in elevation between a central pixel and the mean of its surrounding pixels. A TPI band was added to the six-band surface reflectance image for the purpose of land cover classification, to aid in the differentiation between mountain slope and flat valley bottom land cover during classification. Elevation derivatives calculated from DEMs have been used by others to successfully classify wetland area in the Cordillera Blanca because of the tendency of *bofedales* to occur in low-slope, valley bottoms at high elevations

(Baraer et al., 2015). Furthermore, classification using multispectral data with added elevation derivative bands was found to improve accuracy over using multispectral data alone in other alpine conditions (Edenius et al., 2003; Reese, 2011).

Using the seven-band image, we performed a minimum distance supervised image classification to determine land cover type in QGIS (Congedo, 2016). A minimum of 60 pixels were chosen as training data for each land cover class, including the shadow class. The average spectral signature of the training pixels of each land cover class defines a point in multi-dimensional space. Then, each pixel in the image is classified according to the shortest Euclidian distance from its spectral coordinates to a training class in multi-dimensional space (Lillesand et al., 2004).

To assess classification accuracy, classification results are compared to Google Earth™ reference imagery at fifty 3x3 pixel-sized areas from around the scene. The major class in each area is compared and deemed correctly classified if it matches with the major land cover determined from the reference imagery by a separate researcher. A 3x3 pixel area is used, as opposed to a single pixel comparison to account for misalignment between the reference and analyzed images (Congalton and Green, 1998). Classification accuracy is reported in an error matrix.

Field Data Collection

We installed two clusters of groundwater table monitoring wells in July 2016 in areas of the catchment where the water table is close to the ground surface. Two wells are located in the proglacial valley-bottom wetland near Chuspicocha Lake and four are located in a non-glacierized wetland in a plateau headland down valley from Huacracocha Lake (Figure 1). A hand auger was used to drill the monitoring wells to a maximum depth of 2.1 m. All wells were constructed of 2.54 or 5.08 cm (1 or 2 inch) diameter PVC tubing screened over their entire length. The outer annular space was sealed with bentonite and capped. During drilling, the extracted subsurface material was described at decimeter scale to capture soil and sediment layering and later to parameterize groundwater flow properties for groundwater flow modeling in HYDRUS-1D. A water pressure transducer (Heron Dipperlog Nanos™) was installed in each observation well to record water level at hourly intervals for two years (2016-2018), and a barometric pressure transducer (Heron Barlogs™) was used to perform barometric compensation. Recorded water table depths are used to calibrate one-dimensional soil water flow models.

Given our limited drilling equipment, we were not able to drill wells on grassy hillslopes, talus or bedrock. Instead, we recorded the texture and layering of grassy hillslope soils using existing road cuts or borrow pits in the watershed. Two road cuts/borrow pits into moraine deposits near the community of Acopalca were particularly

useful as they expose up to approximately 10 m of the soil profile, mostly consisting of glacial till (Figure 1).

Daily meteorological data for this study, including minimum and maximum temperature, humidity, barometric pressure and precipitation, was obtained from the Huaytapallana automatic weather station (AWS, 4684 m a.s.l., 11 55' 36"S, 75 3' 42"W) operated by the National Meteorology and Hydrology service of Peru (SENAMHI, <https://www.senamhi.gob.pe/?andp=estaciones>). Meteorological data was recorded from 2013 to 2018. On average, 5% of days were missing data. Gaps in temperature, humidity and pressure measurements were filled by fitting the data to a second or third order polynomial and interpolating the missing values. Missing precipitation measurements were filled using NASA's Tropical Rainfall Measuring Mission data (Huffman and Bolvin, 2018).

One Dimensional Soil Water Flow Model

We used HYDRUS-1D to model the vertical movement of water through the shallow subsurface of different land cover types. HYDRUS-1D numerically computes vertical water flow and storage in variably saturated media using the Richards equation and has been used successfully in numerous studies under various hydrological, climatic and vegetative conditions (Šimůnek et al., 2005). We modeled five vertical soil columns in HYDRUS-1D representing (1) proglacial wetland (Chuspicocha), (2) non-glacial wetland (Huacracocha), (3) grassy hillslope (or grassland since soil profiles are similar), (4) exposed bedrock and (5) talus. Each column model is 5 m deep, with nodal spacing of 0.5 cm.

In HYDRUS-1D, the recorded precipitation is applied to the surface of each simulated soil column. Applied precipitation can infiltrate into the soil, up to an infiltration threshold, beyond which water is ponded on the land surface. Ponding at the soil surface is allowed until a specified maximum head (HCritS) is reached, then any additional water is removed as runoff. Infiltrated water is subject to evapotranspiration within the rooting zone. Root water uptake is simulated using a water stress response function (Feddes et al., 1978). Maximum rooting depths are estimated from field observations. The Priestley and Taylor (1972) method is used to calculate potential evapotranspiration (PET) because of its lower data requirements relative to the Penman-Monteith method. A comparison of ET calculation methods is included in the sensitivity analysis section. A coefficient is applied to scale evapotranspiration according to vegetative cover.

Simulated flow through the soil column is governed by the Richards equation. The van Genuchten (1980) equation is used to calculate hydraulic conductivity (K) as a function of soil moisture. The water retention parameters for each material in the column are selected from the HYDRUS-1D soil catalogue (Cassel and Parrish, 1988) or other literature values (e.g., Heath, 1983) based on the soil texture recorded in the field. Lateral preferential flow through soil macropores is neglected.

The upper boundary condition for hydraulic head at the top of the soil column model must fall between the “minimum allowed surface pressure head criterion” (HCritA) and the “maximum allowed surface pressure head criterion” (HCritS). HCritS is defined by maximum surface water ponding. HCritA is calculated from relative humidity (H_r), the universal gas constant (R , 8.313 J/mol/K), the daily average temperature (T), the molecular weight of water (M , 0.018015 kg/mol) and gravitational acceleration (g) as follows (Šimůnek et al., 2005):

$$HCritA = \frac{RT \ln[H_r]}{Mg} \quad (1)$$

Between HCritA and HCritS, the surface flux is calculated by subtracting evapotranspiration (ET) from the precipitation rate.

Two types of lower boundary conditions are applied to the modeled soil columns – deep drainage and free drainage. A deep-drainage boundary condition is applied to the two wetland soil profiles (Hopmans and Stricker, 1989), whereby flux out the bottom of the soil profile, q , is higher when the water table is closer to the ground surface according to:

$$q = \alpha \exp(\beta |h - GW_{ref}|) \quad (2)$$

where h is the groundwater level, GW_{ref} is the reference groundwater level (set to 510 cm) and α and β are empirical parameters.

For the wetland profiles, HCritS, α , β , saturated hydraulic conductivity (K_s) and saturated and residual soil water content (θ_s and θ_r , respectively) values are calibrated to the groundwater table depth recorded with pressure transducers, as the water table is located within the 5 m model domain. The calibration parameters are varied to minimize the root mean square error (RMSE) and normalized root mean square error (nRMSE, calculated by dividing the RMSE by the mean) between the modeled and measured water table depth over the two years of observations.

For the non-wetland land cover types (talus, rock, and grassy hillslope), we assume, based on the steep slopes and field observations, that the water table is at least 5 m below the land surface and therefore below the model domain. This assumption is supported by three-dimensional groundwater modeling by Somers et al. (2019) in the watershed. Therefore, a free-drainage type bottom boundary condition is applied, where flux out the bottom node is equal to the hydraulic conductivity function solved at the local hydraulic head.

Soil water retention parameters are selected based on literature values. The grassy hillslope column model is assigned water retention properties similar to the proglacial wetland (Chuspicocha) column because of its clay content. For the talus column, K_s was set to a high value characteristic of large, blocky debris and based on measurements by Langston et al. (2013) and Muir et al.

(2011), who observe groundwater flow through talus and moraine complexes. The rock column is characterized by 40 cm of heavily fractured and weathered rock above intact bedrock using literature values for K_s (Heath, 1983).

Each soil column model is run using a variable time step, ranging between 10^{-6} and 5 days. The time varies depending on the number of iterations necessary to reach convergence. For the wetland column models, the initial water table height is set to the approximate water table height of the observation wells, and for the remaining three columns it is set 500 cm below the soil surface (Table 2). A transient spin-up period is applied by repeating the first year of atmospheric data for five years to achieve dynamic equilibrium. We confirm that the model has reached dynamic equilibrium when the bottom flux is nearly identical for two consecutive years (RMSE below 0.02 cm/d).

The models are run for five years (2013–2018). Flux of water from the column bottom serves as our proxy for contribution to streamflow or the deeper groundwater system. Bottom flux, the volume of water stored in each column, and water table depth (wetlands only) are recorded at each time step. The nRMSE between the observed and modeled wetland groundwater levels defines the model error. The magnitude and timing of shallow soil water/groundwater storage and discharge (column bottom flux) is compared among land cover types to determine which cover contributes the most water to dry season streamflow on a per area basis.

Combining Land Cover Classification with Groundwater Fluxes

We combine the results of the land cover classification with the soil column modeling to determine which land cover types contribute the most to streamflow and deeper groundwater recharge at the watershed scale. We first calculate average column model bottom fluxes over the month of September, since this is the driest and most water-stressed time of year. Then, we multiply the average September bottom flux of each land cover type column model by its respective area to get an approximation of the overall contribution and relative importance of a given land cover type in feeding dry season streamflow or recharging the deeper groundwater system.

Sensitivity Analysis

Since we are only able to calibrate the wetland soil column models, we undertook a careful sensitivity analysis to assess the uncertainty associated with our results. We then used the same sensitivity analysis routine to gauge the sensitivity of soil water storage dynamics to climate change.

First, we test model sensitivity to a range of PET calculation methods. Our chosen base case method is the Priestley-Taylor method since it is the most physically based method for which we have the necessary meteorological data for the entire modelled period (Lu

et al., 2005). We compare the model output (soil water discharge and storage) from the base case scenario to the output where PET is calculated using four other methods: Hamon (1963), Malmström (1969), Hargreaves and Samani (1985), and Penman-Monteith. We opted not to use Penman-Monteith as our base-case method because of the low quality of available windspeed and humidity data. However, we include it in the sensitivity analysis for comparison since it is the most physically based PET calculation method. Second, we quantify model sensitivity to doubling or halving K_s (*2 or *0.5). Model sensitivity to a given perturbation is expressed as the RMSE between the base case and the perturbed case.

Finally, we test sensitivity of the column models to various climatic changes to gauge the potential impacts on shallow soil water storage. Five climate scenarios are applied: (1) a slow warming rate of $0.15\text{ }^\circ\text{C decade}^{-1}$, reported by Vuille et al., (2003) from weather stations in the tropical Andes at approximately 4000 m a.s.l. from 1950 to 1994; (2) a fast warming rate of $0.7\text{ }^\circ\text{C decade}^{-1}$, which is observed at the Huayao weather station ($122^\circ 1' \text{ S}$, $7516' 1'' \text{ W}$), located approximately 20 km from the Shullcas River watershed, from 1998 to 2016 – (Both slow and fast warming rates were simulated for 15 years, using the last five years to compare to the base case.); (3) a 20% decrease in precipitation throughout the year; (4) a shorter, more intense rainy season which lasts only three

months (December to February) but received 50% more precipitation; and (5) no precipitation during the first rainy season of the simulation. The precipitation change scenarios are extreme relative to what has been projected but serve to differentiate the impact of different land cover types. CMIP 5 General Circulation Model analysis of precipitation trends in the area between 2021 and 2050 shows only slight changes in precipitation compared to the reference period (López-Moreno et al., 2014).

Results

Satellite Image Classification

The selected land cover classes, including wetland, grassland, grassy hillslope, rock, glacier and water, are illustrated in Figure 2. The training dataset for the supervised minimum distance land cover classification of satellite imagery and classification result are shown in Figures 3a and 3b, respectively. The results indicate that most of the watershed area is classified as grassy hillslope (48%, 65 km^2) and grassland (23%, 31 km^2). The next most abundant land cover class is rock (including bedrock and talus (20%, 27 km^2), followed by wetland (7.4%, 10 km^2), glacier (1.5%, 2 km^2) and water (0.7%, 1 km^2). Pixels classified as shadow are excluded from the above calculations.



Figure 2. Photos from the Shullcas watershed showing the selected land cover classes including (a) bofedal wetland, (b) grasslands and grassy hillslope, (c) grassy hillslope close-up, (d) outcropping fractured bedrock, (e) Chuspicocha glacier, glacier lake and surrounding moraine, and (f) Huacracocha Lake.

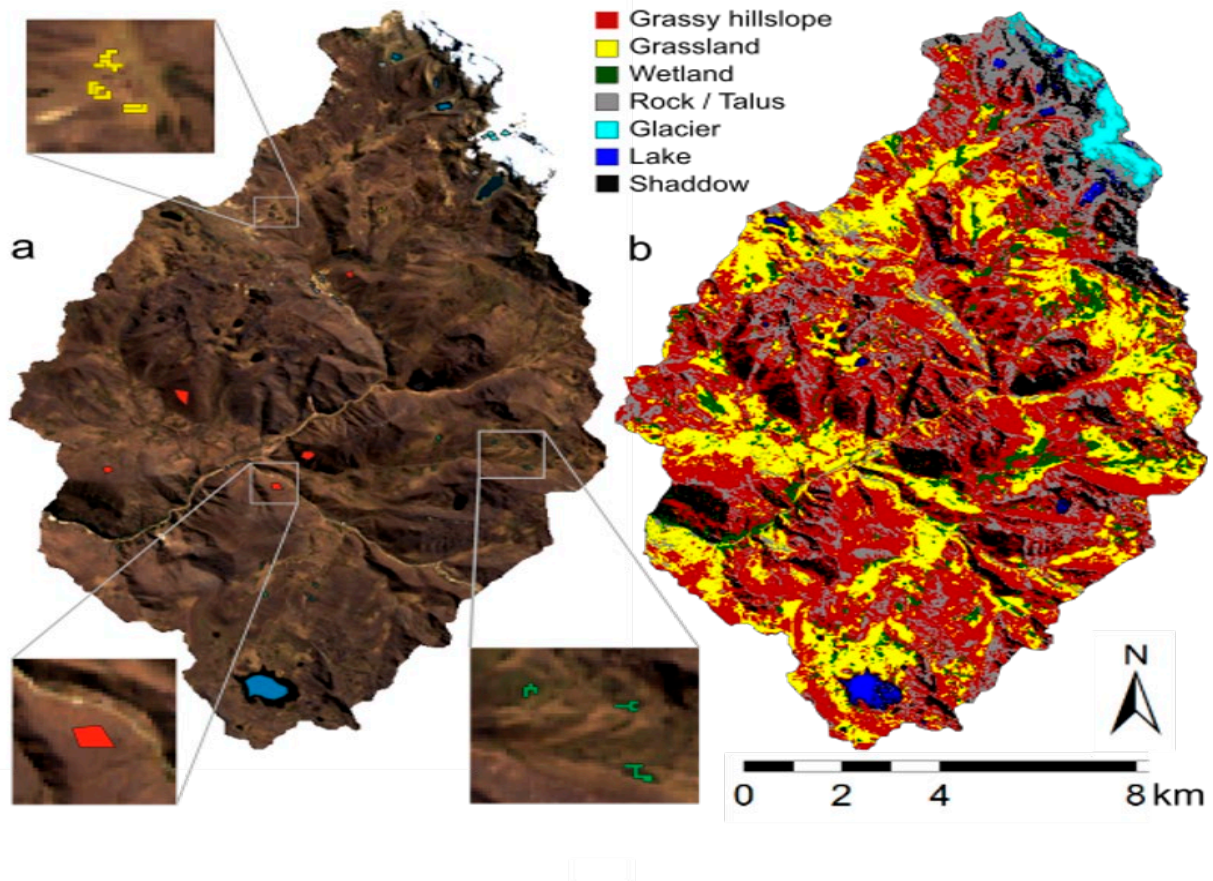


Figure 3. Maps of the Shullcas watershed showing (a) 2017 satellite imagery with training pixels highlighted and close-up callouts, and (b) final classified image

Land cover class prevalence varies with elevation. While rock and ice are mostly located at the highest elevations, high plateaus also show a mixture of grassland, outcropping rock/talus and sporadic wetlands. Grassy hillslope dominates land cover across the mid-elevation areas. Wetlands occur in valley bottoms, as well as in high plateaus where they are mixed with grasslands.

The error matrix (Table 1) indicates that the overall accuracy of the classification is 70%. The classification performs well for the grassy hillslope, rock, and water

classes, where producer’s and user’s accuracies are both greater than or equal to 70%. The dry grassland class has a high producer’s accuracy and low user’s accuracy, indicating that the analysis has over-classified the grassland where some areas should have been grassy hillslope or wetland. A low producer’s accuracy for the wetland class indicates that wetland was under-classified in favor of grassland or grassy hillslope.

Land cover class prevalence varies with elevation. While rock and ice are mostly located at the highest

Table 1. Error matrix for satellite imagery classification. Diagonal cells indicate correctly classified points; other cells indicate difference between our classified image and the Google Earth TM Reference Imagery.

		Reference data							User's accuracy (%)
		Grassy hillslope	Rock	Grassland	Wetland	Water	Ice	Sum	
Classification result	Grassy hillslope	18	3	2	1	0	0	24	75
	Rock	2	7	0	0	0	1	10	70
	Grassland	3	0	5	3	0	0	11	45
	Wetland	0	0	0	3	0	0	3	100
	Water	0	0	0	0	2	0	2	100
	Ice	0	0	0	0	0	0	0	N/A
	Sum	23	10	7	7	2	1	50	
Producer's accuracy (%)		78.26	70	71.43	42.86	100	0		70% (35/50)

elevations, high plateaus also show a mixture of grassland, outcropping rock/talus and sporadic wetlands. Grassy hillslope dominates land cover across the mid-elevation areas. Wetlands occur in valley bottoms, as well as in high plateaus where they are mixed with grasslands.

The error matrix (Table 1) indicates that the overall accuracy of the classification is 70%. The classification performs well for the grassy hillslope, rock, and water classes, where producer's and user's accuracies are both greater than or equal to 70%. The dry grassland class has a high producer's accuracy and low user's accuracy, indicating that the analysis has over-classified the grassland where some areas should have been grassy hillslope or wetland. A low producer's accuracy for the wetland class indicates that wetland was under-classified in favor of grassland or grassy hillslope.

Analysis of Field Data

The five-year daily meteorological observations including temperature (maximum, minimum, and average), precipitation, humidity and the resulting PET at the Huaytapallana AWS are shown in Figure 4. The average daily temperature is 3.12 °C with average maximum and minimum daily temperatures of 7.00 and 0.20 °C, respectively. About 38% of nights reach below freezing temperatures (i.e., below 0 °C), but the minimum daily temperature never reaches below -5 °C. Average annual rainfall was 1054 mm, 80% of which falls during the rainy season, with a maximum of 32.0 mm in a single day. The mean and standard deviation of precipitation is 4.7 ± 7.8 mm/day during the wet season (November to April) and 1.3 ± 2.8 mm/day during the dry season (May to October). The average and standard deviation of relative humidity during the dry season is $66.3 \pm 16.0\%$ compared to $79.5 \pm 12.0\%$ during the rainy season. The average and standard deviation of atmospheric pressure is $503. \pm 3$ mb.

Soil profile information was recorded during auguring of the shallow boreholes and inspection of road cuts/

borrow pits. At the Chuspicocha site, three boreholes were completed (Figure 5a). An organic layer extends 41-58 cm below the ground surface and is mainly underlain by compact grey clay with variable sand content. A gravel seam was encountered in BH1, which was located near a stream preventing deeper drilling. A second layer of organics was encountered in BH2. The clay was likely deposited by lake infilling and the gravel and buried organics are likely the result of past outburst flood events. Four boreholes were completed at the Huacracocha site (Figure 5b). At this site, a thin organic layer extended 20-30 cm below ground surface in two of the boreholes (BH5 and BH6) and was absent in the others which are in depressions (BH4 and BH7). Below the organics layer, compact grey and brown clays were encountered and interlayered with sand and gravel seams. The layering observed in the boreholes was used to create representative 500 cm-deep soil profiles for flow modeling (Figure 5). Both modeled profiles are mainly composed of clays, the main difference is that the non-glacial profile has a thinner organics layer at the surface and more sandy layers interbedded at depth. The road cuts/borrow pits near the town of Acopalca define subsurface materials for grassy hillslopes. The subsurface material there is a uniform, poorly-sorted mixture of clay, silt, and sand with some cobbles, presumed to be glacial till.

Water table depth in the wetlands was monitored between August 2016 and May 2018. Water table depth has a greater range at Huacracocha (non-glacial, 176 cm) than at the Chuspicocha site (proglacial, 62 cm). The mean and standard deviation water table depth during the wet and dry season is -15.6 ± 16.2 and -71.3 ± 40.9 cm, respectively, at Huacracocha, and -20.3 ± 9.8 and -34.6 ± 12.7 cm at Chuspicocha (Figures 5a and 5b). The water table rises above the land surface for 7% of observations (about 26 days/year) at Huacracocha, but spends very little time (0.03%, <1 day per year) above the land surface at Chuspicocha, which is less hummocky.

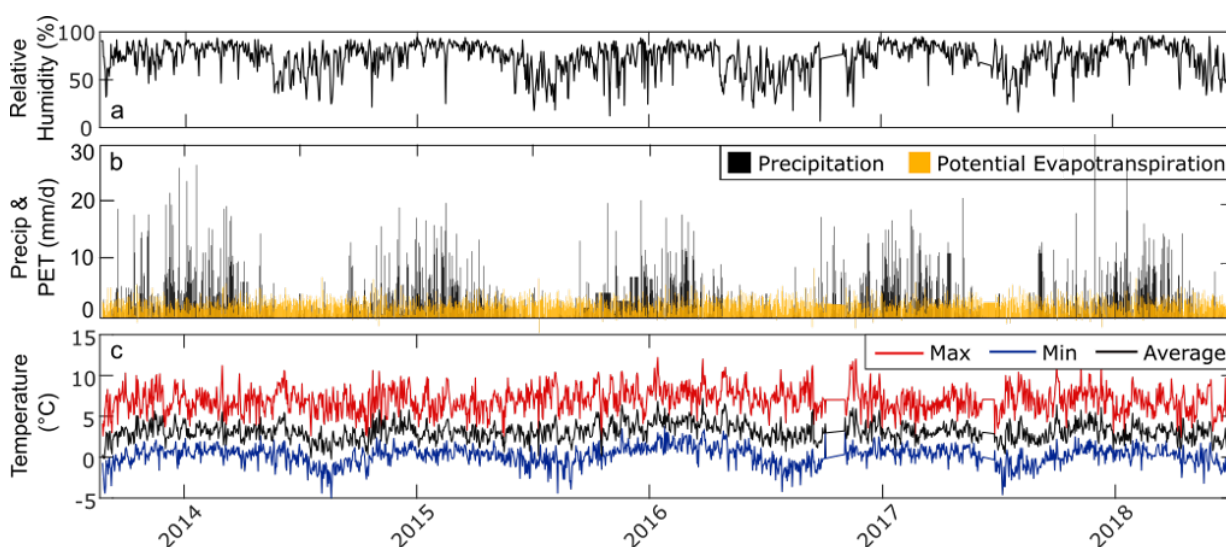


Figure 4. Daily meteorological data from the Huaytapallana AWS, including (a) relative humidity, (b) precipitation and Priestley-Taylor PET, and (c) maximum, minimum and average temperature.

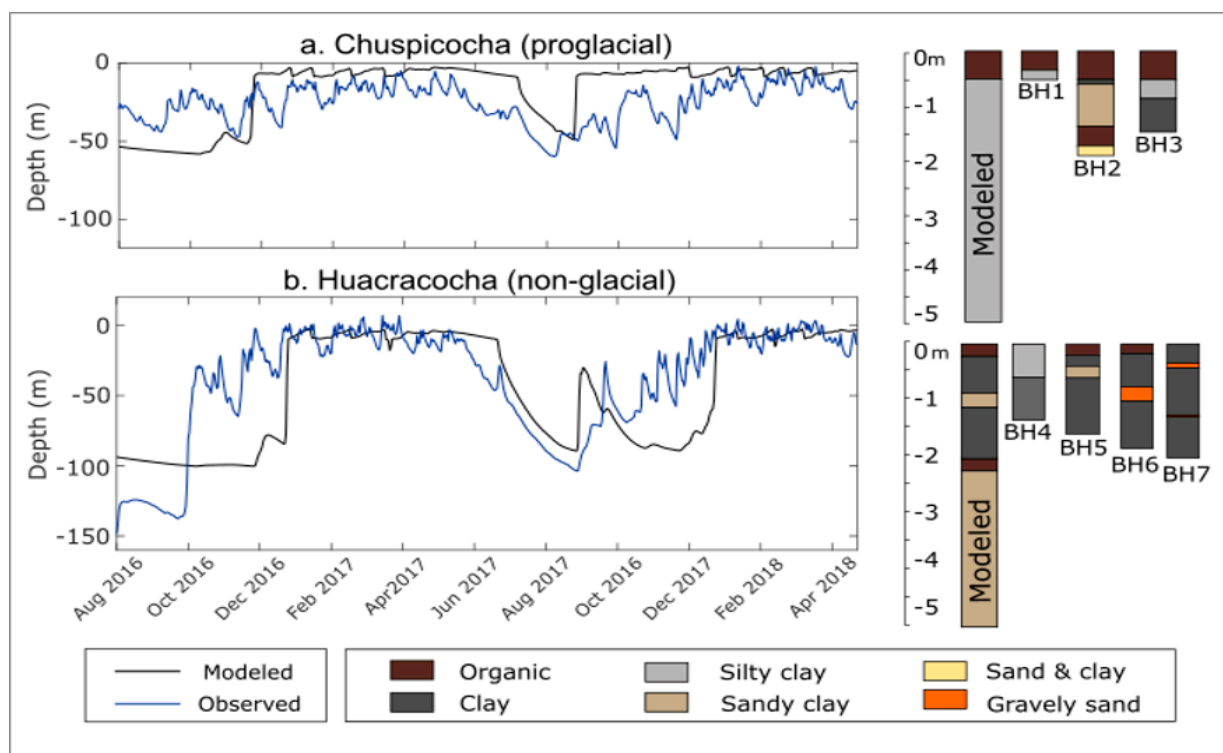


Figure 5. Measured and modeled water table depth (left) beside measured and modeled soil columns (right) for (a) Chuspicocha wetland and (b) Huacracocho wetland.

Soil Water Flow Models

Soil column model boundary conditions and water retention parameters are listed in Tables 2 and 3, respectively. Manual calibration of the wetland soil profiles results in an RMSE between the observed and modeled water table of 32.0 cm (nRMSE=18.5%) in the non-glacial wetland, and 21.7 cm (nRMSE=35.2%) in the pro-glacial wetland column model. Figure 5 compares the observed and modeled water table depths.

Outputs from the HYDRUS-1D column models, including water table depth (where applicable), bottom flux and water storage volume are presented in Figure 6. In the wetland columns, the simulated water table remains within 100 cm of the soil surface (Figure 6b). The non-glacial wetland model has a larger range (98 cm) in water table depth than the proglacial wetland (57 cm), similar to the observed data. In both wetlands, sharp increases in water table height (decrease in depth) occur around December and the water table remains

Table 2. Boundary and initial conditions for HYDRUS-1D soil column modeling.

	Non-glacial wetland	Proglacial wetland	Grassy hillslope	Talus	Rock
Max head at soil surface (ponding, cm)	10	10	0	0	0
Deep drainage conditions	α (cm/day)	-0.3	-0.4	Free Drainage	
	β (cm/day)	-0.023	-0.05		
	GW_{ref} (cm)	510	510		
Evaporation coefficient	1.1	1.1	1	0.7	0.7
Initial water table height (cm)	0	-90	-500	-500	-500
RMSE of final 2 years of spin-up (cm)	0.0042	0.012	0.0028	0.0065	0.0074
Rooting depth (cm)	10	30	30	0	0

Table 3. Van Genuchten (1980) soil water retention parameters for soil column models, including residual and saturated soil water content (θ_r and θ_s), empirical alpha and n parameters, and saturated hydraulic conductivity (K_s).

	Depth range (cm)	θ_r	θ_s	Alpha (1/cm)	n	K_s (cm/day)	Description
Proglacial wetland	0-40	0.195	0.43	0.054	1.56	3	Organic
	40-500	0.09	0.43	0.218	2.68	10	Clay
Non-glacial wetland	0-20, 200-220	0.078	0.43	0.036	1.56	2.496	Organic
	20-80, 110-200, 220-280	0.036	0.5	0.019	1.31	6.24	Clay
	80-110, 280-500	0.021	0.5	0.145	2.68	71.28	Sandy Clay
Grassy hillslope	0-50	0.195	0.43	0.054	1.56	3	Loam
	50-500	0.036	0.5	0.049	1.94	6.24	Glacial till
Rock	0-40	0.09	0.4	0.145	2.68	100	Fractured metamorphic rock
	40-500	0.09	0.4	0.145	2.68	10	Lightly fractured metamorphic rock
Talus	0-500	0.1	0.39	0.059	1.48	700	Gravel, cobbles and boulders

consistently at or near the ground surface throughout the rainy season in both wetlands. The maximum water table depths occur just after the beginning of the rainy season, around October and November.

Column bottom flux (Figure 6c) – our proxy for contribution to streamflow or the deeper groundwater system – is, on average, highest in the rock (0.199 cm/day) and grassy hillslope (0.198 cm/day) columns, followed by the talus (0.167 cm/day), and then proglacial (0.127 cm/day) and non-glacierized (0.122 cm/day) wetlands. Maximum bottom flux occurs between February and April in all the column models, while the minimum

bottom fluxes are more spaced out over the year (Table 4).

In the wetland simulations, bottom flux increases around November as the water table rises, remains consistently high through the rainy season, and falls sharply around June. Wetland bottom flux is less variable than that for non-wetland columns. The non-wetland simulations show larger increases in bottom flux after the onset of precipitation. Each of the non-wetland columns exhibits slowly decreasing bottom flux after the end of the rainy season, well into the dry season. The timing of the annual increase in bottom flux is related to the saturated hydraulic conductivity of the material. The increase

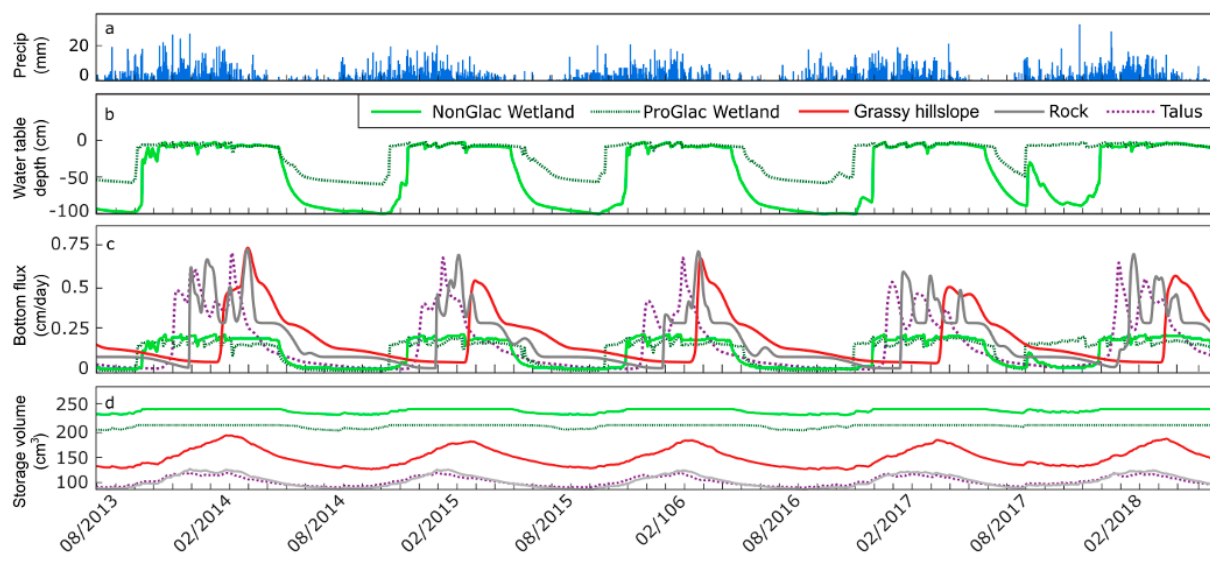


Figure 6. Outputs from HYDRUS-1D for five representative soil column and (a) precipitation for comparison, including (b) water table depth (wetlands only), (c) water flux through column bottom, and (d) water volume stored in the column.

Table 4. Average (n = 4 years) date and magnitude of maximum and minimum bottom flux of each column model (vBot). Positive values indicate a downward direction of water flow. The average and standard deviation (std. dev.) are calculated over the month of the minimum/maximum.

	Maximum vBot (cm)			Minimum vBot (cm)		
	Date	Average ± std. dev.		Date	Average ± std. dev.	
Non-glacial wetland	11-Feb	0.2	± 0.01	30-Aug	0.03	± 0.005
Proglacial wetland	09-Feb	0.2	± 0.02	23-Oct	0.05	± 0.07
Grassy hillslope	20-Apr	0.4	± 0.2	22-Mar	0.1	± 0.1
Rock	25-Mar	0.4	± 0.1	04-Feb	0.3	± 0.2
Talus	02-Mar	0.45	± 0.09	14-Dec	0.052	± 0.08

occurs around mid-January for the talus column (highest K_s), in February for the fractured rock column (2nd highest K_s), and at the end of March for the grassy hillslope (3rd highest K_s). Cumulative infiltration at the end of the modeling period is largest in the talus, rock and grassy hillslope columns (539, 538 and 536 cm³, respectively) and smaller in the for non-glacial and proglacial wetland columns (369 and 309 cm³, respectively).

The non-glacial (243 cm³) and proglacial (213 cm³) wetland soil column simulations consistently store the largest volume of water in the shallow subsurface, as expected, and exhibit the least variability (max - min = 12 cm³; Figure 6d). The grassy hillslope stores the next most water on average (150 cm³), followed by the rock and talus column models (both at 102 cm³). Average range in water storage among the non-wetland columns was 30 cm³.

Combining Land Cover Classification and Groundwater Fluxes

We multiply the land area from land cover classification by the soil column bottom flux to estimate the relative importance of different land cover types in the storage and discharge of shallow groundwater and soil water during the driest part of the year. For the month of September, the highest total contribution to streamflow and/or the underlying groundwater system, was from the grassy hillslope at $9.4 \pm 0.3 \times 10^4$ m³/day (81±25 % of the total), followed by rock and talus at $1.9 \pm 2.0 \times 10^4$ m³/day (1.6±2% of the total) and wetland at $3.9 \pm 0.8 \times 10^3$ m³/day (4±1% of the total).

Similarly, we multiply total water storage in each column by the respective land area. The highest total water storage over the month of September is in the grassy hillslope land cover at $8.6 \pm 2.8 \times 10^3$ m³ (65±22% of the total) followed by the rock and talus units, at $2.5 \pm 0.3 \times 10^3$ m³ (19±2% of the total), and then the wetlands, at $2.3 \pm 0.5 \times 10^3$ m³ (17±4% of the total). Here, the presented uncertainties are calculated as the nRMSE between the modeled and observed water table depth for the wetland, and the nRMSE from the sensitivity analysis of PET calculation methods for the non-wetland columns.

Sensitivity Analysis

In general, column model bottom flux is quite sensitive to the method of PET calculation and K_s (Table 5). Maximum RMSE between the bottom flux for base case (Priestley-Taylor) and sensitivity runs for each column is highest for the rock column model, at 18.3%, followed by talus at 18.7%, grassy hillslope at 15.5%, proglacial wetland at 9% and non-glacial wetland at 8.5%. Of all the PET calculation methods tested, the Penman-Monteith method matched most closely with the Priestley-Taylor method for the non-glacial wetland and the grassy hillslope column models; the Malmström method matched most closely for the proglacial wetland, and the Hamon method, for the rock and the talus model. Sensitivity to doubling or halving K_s was slightly lower than sensitivity to PET calculation method.

For the climate scenarios, only modest decreases were observed in bottom flux as a result of the slow and fast warming rates (scenarios 1 and 2). The wetland columns showed slightly more sensitivity to a slowly warming climate than other land cover types, perhaps because of the availability of water in the rooting zone for ET year-round. The rock and talus columns showed considerably more sensitivity to a quickly warming climate (scenario 2) compared to other land cover types.

The wetland column simulations were less sensitive to all three changes to precipitation (scenarios 3, 4 and 5) than other land cover types. However, the non-wetland columns recovered faster from a drought year (scenario 5). Applying shorter and more intense precipitation (scenario 4) caused the bottom flux in all column models to rise slightly later and fall slightly earlier in the year.

Discussion

Which Land Cover Types Feed Dry Season Streamflow?

Our results show that while wetlands store the most water per unit area, they contribute relatively little to streamflow at the watershed scale. Since the water table remains close to the ground surface during the rainy season, a lot of excess precipitation is rejected and becomes overland flow. Therefore, total wetland bottom flux is lower than the unsaturated non-wetland columns.

Table 5. Sensitivity analysis results showing the RMSE between the bottom flux base case simulation and the sensitivity run for each soil column model.

Sensitivity Parameter		RMSE Bottom Flux (cm)					
		Non-glacial wetland	Proglacial wetland	Grassy hillslope	Rock	Talus	
PET	Malmström (1969)	6.3E-02	5.5E-02	1.3E-01	1.4E-01	1.4E-01	
	Hargreaves and Samani (1985)	7.3E-02	6.5E-02	1.4E-01	1.3E-01	1.4E-01	
	Hamon (1963)	6.9E-02	5.5E-02	1.3E-01	1.1E-01	1.1E-01	
	Penman-Monteith	4.7E-02	6.3E-02	1.2E-01	1.6E-01	1.3E-01	
Hydraulic Conductivity	$K_s \times 2$	4.6E-02	4.6E-02	5.9E-02	9.0E-02	2.9E-02	
	$\frac{K_s}{2}$	4.5E-02	5.3E-02	5.7E-02	1.0E-01	3.9E-02	
Climate Scenarios	(1) Slow warming rate (0.15 °C decade ⁻¹)	5.8E-03	8.0E-03	2.6E-03	3.0E-03	1.2E-03	
	(2) Fast warming rate (0.7 °C decade ⁻¹)	6.3E-03	8.3E-03	3.5E-03	1.8E-01	1.9E-01	
	(3) 20% less precipitation	5.0E-02	3.7E-02	1.5E-01	1.3E-01	1.1E-01	
	(4) 50% more precipitation, short rainy season	8.5E-02	9.0E-02	9.8E-02	1.5E-01	1.5E-01	
	Overall	6.7E-02	7.9E-02	1.3E-01	1.3E-01	1.2E-01	
	2014	1.4E-01	1.3E-01	2.5E-01	2.7E-01	2.6E-01	
	(5) Drought year	2015	5.0E-02	6.2E-02	1.4E-01	1.0E-01	6.6E-02
	2016	1.1E-02	6.7E-02	2.1E-05	3.3E-04	6.1E-05	
	2017	2.3E-03	7.6E-02	9.3E-05	3.6E-04	8.6E-05	

A similar phenomenon was observed by McClymont et al. (2010), where available recharge exceeds subsurface storage capacity in an alpine meadow-talus complex in the Canadian Rockies. The importance of wetlands in feeding streamflow is further limited by their relatively small area in the Shullcas watershed (7%) which is consistent with wetland areas reported for parts of the Cordillera Blanca of 1-12%, by Baraer et al. (2015) and 11% by Chimner et al. (2019).

The grassy hillslope, talus, and rock land cover exhibit a larger range in bottom flux, peaking late in the rainy season and gradually decreasing over the dry season. Since unsaturated K decreases with decreasing soil moisture content, water flows slowly through the unsaturated zone and bottom flux remains considerable in the grassy hillslope and rock at the end of the dry season. For comparison, Somers et al. (2018) implement a 3D groundwater flow model for a grassy sub-catchment of the Shullcas watershed and found a similar range in groundwater recharge (~0.5-4 mm/day, Figure 5) and similar seasonal patterns to our study's grassy hillslope column model bottom flux (~0.5-5mm/day). The importance of grassy hillslope drainage is amplified by

its large spatial extent (47% grassy hillslope and 22% grassland) making it by far the largest contributor to dry season streamflow at the watershed scale.

The talus column model has a high cumulative bottom flux, in part because of the reduced vegetative cover and ET. It also drains more quickly than the grassy hillslope, given its higher K, and contributes less bottom flux towards streamflow by the end of the dry season (similar in magnitude to the wetlands, per unit area). However talus slopes are likely mixed with glacial till materials (lower K), explaining a longer baseflow recession pattern observed in alpine field sites elsewhere (e.g., Hood and Hayashi, 2015; Weekes et al., 2015). Other studies have highlighted the importance of coarse deposits in facilitating groundwater exchange with streams (Clow et al., 2003; Gordon et al., 2015; Somers et al., 2016) though this is beyond the scope of our study.

Hydrologic Resilience of Land cover Types to Climate Change

Our simulations demonstrate that wetlands are most resilient to the applied climate scenarios, in part because their subsurface storage is fully replenished

each rainy season when the water table reaches the land surface. However, given the low permeability of their underlying clays, the wetlands also took longer to recover from a drought year than the other land cover types. 3D groundwater modeling by Somers et al. (2019) independently found that wetlands in the Shullcas watershed exhibit the smallest declines in hydraulic head in response to downscaled climate projections due to their topographic position. Accurate classification and future fate of alpine wetlands or *bofedales* is of particular interest because they sequester carbon, provide land for livestock grazing across the Andes and tend to be biodiversity hot spots (Maldonado Fonkén, 2014/2015).

We do not attempt to account for shifting alpine land cover in response to climate change, but it is understood that glacial recession reveals fresh rock and till for plant colonization while vegetative biomes migrate upslope (Young et al., 2014). Polk et al. (2017) suggest proglacial wetlands may shrink in response to declining meltwater, though Cooper et al. (2019) downplay the role that glacier melt plays in recharging wetlands in the central Andes. Since our study is focused on the shallow subsurface, we neglect the importance of underlying bedrock geology on baseflow to alpine rivers. Tague et al. (2008) and Markovich et al. (2016) find that the mountain watersheds underlain by more permeable bedrock have higher baseflow and are therefore likely to be more resilient to climate change.

Merits and Limitations of Approach

Our study presents a unique approach to characterizing the distribution and hydrologic functioning of alpine land cover. However, there are several limitations and assumptions that should be considered when interpreting the results. Most importantly, we were not able to install groundwater table wells into grassy hillslopes, rock or talus and therefore were not able to calibrate the corresponding soil column models, but instead relied on literature values for the non-wetland soil water retention parameters. The remote, rugged location, limited drilling equipment, and protected status of the watershed prevented the installation of monitoring wells in these areas. Additionally, even where calibration data exists, non-unique groundwater flow solutions are possible. Literature values of hydraulic conductivity can vary substantially for talus units, (Langston et al., 2013; McClymont et al., 2010; Muir et al., 2011), glacial till (Ronayne et al., 2012), and variably fractured and weathered bedrock (Welch and Allen, 2014), introducing uncertainty to our analysis. However, in general, wetland clays and hillslope till are very likely to have lower permeability than talus and fractured rock. Therefore, our qualitative conclusions are reliable, though exact magnitudes are more uncertain.

Additionally, our approach is not able to capture the interactions between different land cover types/geomorphic features such as the channeling of groundwater recharge through talus slopes into wetlands

or groundwater flow through deeper bedrock layers which underlie our near-surface analysis (Frisbee et al., 2011). Instead, we assume that the lateral contributions from overland flow, interflow, or groundwater flow from other units were net zero (lateral inflow = lateral outflow). This assumption allows us to calibrate our 1D model to water table level measurements in the field for the wetland column models. Since our observation wells are located in the middle of gently and consistently sloping wetlands, we expect the influence of lateral flow on our results is minimal.

Where many previous studies on alpine groundwater focus on small catchments (<10 km², e.g., Hood and Hayashi, 2015; Liu et al., 2004; Saberi et al., 2019), our study integrates hydrologic functioning with the actual prevalence of different land cover types at the watershed scale. The approach could be improved by more detailed subsurface data, though a lack of observation data in upland areas remains a challenge across the discipline of alpine hydrogeology (Somers and McKenzie, 2020). Soil moisture sensors could be used as an alternative or complement to monitoring wells to improve model calibration, particularly where the water table is far below ground surface.

Conclusions

In this study, we investigated the abundance and hydrological regimes of different land cover types in the Shullcas watershed. By classifying satellite imagery, we found that alpine grasslands are the dominant land cover type, covering 71% of the study area, followed by rock (20%) and wetland (7.4%). We then used one-dimensional variably-saturated groundwater modeling to simulate shallow groundwater dynamics for the different land cover types and compare water storage and release patterns. The results suggest that grasslands are likely the largest contributors to groundwater recharge and dry season streamflow given their widespread areal coverage in the watershed and their large annual water storage change. Although wetland coverage is relatively small in the catchment, wetland contributions to total dry season water storage surpassed that of the talus and rock units.

Seasonal patterns in outflow differed between wetland and non-wetland column models, with the wetland outflow flux remaining relatively small and consistent while the non-wetland models had several peaks in outflow during the rainy season followed by slow decline throughout the dry season. Sensitivity analysis highlights the importance of the bofedal wetlands in maintaining high altitude water storage by being resilient to warming temperatures and different precipitation regimes.

As climate change continues to cause the rapid retreat of tropical mountain glaciers, dry season stream discharge becomes increasingly dependent on groundwater inputs (Glas et al., 2018). This study highlights the distinct hydrologic roles played by different land cover types in Andean watersheds. It can be used to inform

land conservation and planning decisions to maintain groundwater recharge. However, more field data and robust modeling is required to quantify the water stored in these environments and to make more detailed predictions about future water availability in the region. Furthermore, our approach can be applied to other watersheds or expanded to examine human impacts on mountain land cover and hydrological functioning, like livestock grazing or forestry.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), the Fonds de recherche du Québec-nature et technologies (FRQNT) and the National Science Foundation Partnerships for Enhanced Engagement in Research (NSF-PEER,16 Project 3-127, NSF EAR-1316432) for financial support. We would also like to thank SENAMHI Peru for the collection of meteorological data and our field assistants: Américo and Álvaro González Caldua, Oliver Wigmore, Pierrick Lamontagne-Hallé, and Nadine Shatilla.

References

- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2010). *Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Mantaro*. Ministerio de Agricultura, Lima. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/evaluacion-de-recursos-hidricos-superficiales-en-la-cuenca-del-rio-mantaro>
- Baraer, M., McKenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., Knox, S. and Fortner, S. K. (2015). Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: A multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 29(11), 2561-2581. doi.org/10.1002/hyp.10386
- Barnett, T. P., Adam, J. C. and Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309. doi.org/10.1038/nature04141
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., McKenzie, J. M., Baraer, M., French, A. and Polk, M. H. (2013). New geographies of water and climate change in Peru: Coupled natural and social transformations in the Santa River watershed. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 363-374. doi.org/10.1080/00045608.2013.754665
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F. and Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756. doi.org/10.1126/science.1128087
- Buytaert, W. and Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784-1799. doi.org/10.1002/hyp.7936
- Caballero, Y., Jomelli, V., Chevallier, P. and Ribstein, P. (2002). Hydrological characteristics of slope deposits in high tropical mountains (Cordillera Real, Bolivia). *Catena*, 47(2), 101-116. doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00179-5
- Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R. and 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(A), 60-70. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.006
- Carsel, R. F. and Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755-769. doi.org/10.1029/WR024i005p00755
- Congedo, L. (2016). *Semi-automatic classification plugin documentation. Release 6.0.1.1*. doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
- Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L., Grelik, S., Hribljan, J. A., Planas Clarke, A. M., Polk, M. H., Lilleskov, E. A. and Fuentealba, B. (2019). Mapping mountain peatlands and wet meadows using multi-date, multi-sensor remote sensing in the Cordillera Blanca, Peru. *Wetlands*, 39, 1057-1067. doi.org/10.1007/s13157-019-01134-1
- Cooper, D. J., Sueltenfuss, J., Oyague, E., Yager, K., Slayback,

- D., Cabero Caballero, E. M., Argollo, J. and Mark, B. G. (2019). Drivers of peatland water table dynamics in the central Andes, Bolivia and Peru. *Hydrological Processes*, 33(13), 1913-1925. doi.org/10.1002/hyp.13446
- Clow, D. W., Schrott, L., Webb, R., Campbell, K., Torizzo, A. O. and Dornblaser, M. (2003). Groundwater occurrence and contributions to streamflow in an alpine catchment, Colorado Front Range. *Groundwater*, 41(7), 937-950. doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02436.x
- Congalton, R. G. and Green, K. (1998). *Assessing the accuracy of remotely sensed data principles and practices*. Boca Raton, Florida, Lewis Publishers.
- Dinerstein, E., Olson, D. M., Graham, D. J., Webster, A. L., Primm, S. A., Bookbinder, M. P. and Ledec, G. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. Washington, D.C., World Bank and World Wildlife Fund. <http://documents.worldbank.org/curated/en/957541468270313045/pdf/multi-page.pdf>
- Edenius, L., Vencatasawmy, C. P., Sandström, P. and Dahlberg, U. (2003). Combining satellite imagery and ancillary data to map snowbed vegetation important to reindeer *Rangifer tarandus*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(2), 150-157. doi.org/10.1657/1523-0430(2003)035[0150:CSIAAD]2.0.CO;2
- Feddes, R. A., Kowalik, P. I. and Zaradny, H. (1978). *Simulation of field water use and crop yield*. New York, John Wiley and Sons.
- Frisbee, M. D., Phillips, F. M., Campbell, A. R., Liu, F. and Sanchez, S. A. (2011). Streamflow generation in a large, alpine watershed in the southern Rocky Mountains of Colorado: Is streamflow generation simply the aggregation of hillslope runoff responses? *Water Resources Research*, 47(6). <https://doi.org/10.1029/2010WR009391>
- Glas, R., Lautz, L., McKenzie, J., Mark, B., Baraer, M., Chavez, D. and Maharaj, L. (2018). A review of the current state of knowledge of proglacial hydrogeology in the Cordillera Blanca, Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(5), e1299. doi.org/10.1002/wat2.1299
- Gordon, R. P., Lautz, L. K., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Chavez, D. and Baraer, M. (2015). Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 522, 628-644. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.013
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. doi:10.13031/2013.26773
- Hayashi, M. (2020). Alpine hydrogeology: The critical role of groundwater in sourcing the headwaters of the world. *Groundwater*, 58(4), 498-510. doi.org/10.1111/gwat.12965
- Hamon, W. R. (1963). Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 63, 52-62. <https://iahs.info/uploads/dms/063006.pdf>
- Heath, R. C. (1983). *Basic ground-water hydrology*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86p. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Hood, J. L., Roy, J. W. and Hayashi, M. (2006). Importance of groundwater in the water balance of an alpine headwater lake. *Geophysical Research Letters*, 33(13). doi.org/10.1029/2006GL026611
- Hood, J. L. and Hayashi, M. (2015). Characterization of snowmelt flux and groundwater storage in an alpine headwater basin. *Journal of Hydrology*, 521, 482-497. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.041
- Hopmans, J. W. and Stricker, J. N. M. (1989). Stochastic analysis of soil water regime in a watershed. *Journal of Hydrology*, 105(1-2), 57-84. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90096-6](http://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90096-6)
- Huffman, G. J. and Bolvin, D. T. (2018). *Real-time TRMM multi-satellite precipitation analysis data set documentation*. Version 7. Ebook, NASA. https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/3B4XRT_doc_V7_180426.pdf
- Käser, D. and Hunkeler, D. (2016). Contribution of alluvial groundwater to the outflow of mountainous catchments. *Water Resources Research*, 52(2), 680-697. doi.org/10.1002/2014WR016730
- Kosugi, K., Katsura, S., Katsuyama, M. and Mizuyama, T. (2006). Water flow processes in weathered granitic bedrock and their effects on runoff generation in a small headwater catchment. *Water Resources Research*, 42(2), W02414. doi.org/10.1029/2005WR004275
- Langston, G., Hayashi, M. and Roy, J. W. (2013). Quantifying groundwater-surface water interactions in a proglacial moraine using heat and solute tracers. *Water Resources Research*, 49(9), 5411-5426. doi.org/10.1002/wrcr.20372.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. and Chipman, J. W. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (5th ed.). Hoboken, New Jersey, Wiley and Sons.
- Liu, F., Williams, M. W. and Caine, N. (2004). Source waters and flow paths in an alpine catchment, Colorado Front Range, United States. *Water Resources Research*, 40(9), W09401. doi.org/10.1029/2004WR003076
- 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. and Cochachin-Rapré, J. A. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1-11. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S. G. and Amatya, D. M. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 621-633. doi:10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x
- Maldonado Fonkén, M. S. (2014/2015). An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes. *Mires and Peat*, 15(5), 1-13. http://mires-and-peat.net/media/map15/map_15_05.pdf
- Malmström, V. H. (1969). A new approach to the classification

- of climate. *Journal of Geography*, 68(6), 351-357. doi.org/10.1080/00221346908981131
- Mark, B. G., French, A., Baraer, M., Carey, M., Bury, J., Young, K. R., Polk, M. H., Wigmore, O., Lagos, P., Crumlay, R., McKenzie, J. M. and Lautz, L. (2017). Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 159, 61-76. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.003
- Markovich, K. H., Maxwell, R. M., and Fogg, G. E. (2016). Hydrogeological response to climate change in alpine hillslopes. *Hydrological Processes*, 30(18), 3126–3138. doi.org/10.1002/hyp.10851
- McClymont, A. F., Hayashi, M., Bentley, L. R., Muir, D. and Ernst, E. (2010). Groundwater flow and storage within an alpine meadow-talus complex. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 859–872. doi.org/10.5194/hess-14-859-2010
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Céleri, R., Wilcox, B. P. and Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with area extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010
- Muir, D. L., Hayashi, M. and McClymont, A. F. (2011). Hydrological storage and transmission characteristics of an alpine talus. *Hydrological Processes*, 25(19), 2954-2966. doi.org/10.1002/hyp.8060
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., Williamson, S. N. and Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5, 424-430. doi.org/10.1038/nclimate2563
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J. and Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied geography*, 78, 94-103. doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2
- Reese, H. (2011). *Classification of Sweden's forest and alpine vegetation using optical satellite and inventory data*. Doctoral thesis. Umeå, Swedish University of Agricultural Sciences. https://pub.epsilon.slu.se/8349/1/reese_h_110927.pdf
- Ronayne, M. J., Houghton, T. B. and Stednick, J. D (2012). Field characterization of hydraulic conductivity in a heterogeneous alpine glacial till. *Journal of Hydrology*, 458-458, 103-109. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.036
- Salvador, F., Moneris, J. and Rochefort, L. (2014/2015). Peatlands of the Peruvian puna ecoregion: Types, characteristics and disturbance. *Mires and Peat*, 15(3), 1-17. <http://mires-and-peat.net/pages/volumes/map15/map1503.php>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. and Šejna, M. (2005). *The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 3.0*. Riverside, California, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside. www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P2119.pdf
- Saberi, L., McLaughlin, R. T., Ng, G.-H. C., La Frenierre, J., Wickert, A. D., Baraer, M., Zhi, W., Li, L. and Mark, B. G. (2019). Multi-scale temporal variability in meltwater contributions in a tropical glacierized watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 405–425. doi.org/10.5194/hess-23-405-2019
- Smith, J. A., Lin, T. L., and Ranson, K. J. (1980). The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(9), 1183-1189. www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1980journal/sep/1980_sep_1183-1189.pdf
- Somers, L. D., Gordon, R. P., McKenzie, J. M., Lautz, L. K., Wigmore, O., Glose, A., Glas, R., Aubry-Wake, C., Mark, B., Baraer, M. and Condom, T. (2016). Quantifying groundwater-surface water interactions in a proglacial valley, Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 30(17), 2915-2929. doi.org/10.1002/hyp.10912
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Zipper, S. C., Mark, B. G., Lagos, P. and Baraer, M. (2018). Does hillslope trenching enhance groundwater recharge and baseflow in the Peruvian Andes? *Hydrological Processes*, 32(3), 318-331. doi.org/10.1002/hyp.11423
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G.-H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraer, M. and Silva, Y. (2019). Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed - but not forever. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13016-13026. doi.org/10.1029/2019GL084730
- Somers, L. D. and McKenzie, J. M. (2020). A review of groundwater in high mountain environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(6), e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D. B., Oimoen, M. J., Zhang, Z., Danielson, J. J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M. and Carbajal, C. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model version 2—Summary of validation results. Ebook. https://lpdaac.usgs.gov/documents/220/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
- Tague, C., Grant, G., Farrell, M., Choate, J. and Jefferson, A. (2008). Deep groundwater mediates streamflow response to climate warming in the Oregon Cascades. *Climatic Change*, 86(1), 189–210. doi.org/10.1007/s10584-007-9294-8
- UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos). (2014). *Inventario de glaciares del Perú*. UGRH, Autoridad Nacional del Agua, Huaraz, Perú. http://groundwater.sdsu.edu/INVENTARIO_GLACIARES_ANA.pdf

- USGS. (2017). *Land Product Characterization System (LPCS)*. Version 2.7. https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lpcs_user_guide.pdf [non-functioning]
<https://www.usgs.gov/rca-eo/using-land-product-characterization-system> [alternative]
- USGS. (2019). *Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product Guide*. Version 2.0. Sioux Falls, South Dakota. https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1368_L8_SurfaceReflectanceCode-LASRC_ProductGuide-v2.pdf [non-functioning]
<file:///C:/Users/Ada/Downloads/andSurfaceReflectanceCodeLaSRCPProductGuide.pdf> [alternative]
- van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Verzijl, A. and Guerrero Quispe, S. (2013). The system nobody sees: Irrigated wetland management and alpaca herding in the Peruvian Andes. *Mountain Research and Development*, 33(3), 280–293. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00123.1
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. and Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7), W07447, 1–13. doi.org/10.1029/2006WR005653
- Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M. and Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. In Diaz, H. F. (Ed.), *Climate variability and change in high elevation regions: Past, present and future*, 75–99. Dordrecht, Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-015-1252-7_5
- Weekes, A. A., Torgersen, C. E., Montgomery, D. R., Woodward, A. and Bolton, S. M. (2015). Hydrologic response to valley-scale structure in alpine headwaters. *Hydrological Processes*, 29(3), 356–372. doi.org/10.1002/hyp.10141.
- Welch, L. A. and Allen, D. M. (2014). Hydraulic conductivity characteristics in mountains and implications for conceptualizing bedrock groundwater flow. *Hydrogeology Journal*, 22, 1003–1026. doi.org/10.1007/s10040-014-1121-5.
- Young, K. R. (2014). Ecology of land cover change in glaciated tropical mountains. *Revista Peruana de Biología*, 21(3), 259–270. dx.doi.org/10.15381/rpb.v21i3.10900
- Young, K. R., Bury, J., Carey, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Baraer, M., French, A. and Polk, M. H. (2017). A socioecological perspective on change driven by both social and climatic factors: The Santa River in Peru. In *The Lima declaration on biodiversity and climate change: Contributions from science to policy for sustainable development*. CBD Technical Series, 89, 116–121. <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-89-en.pdf>.



COMMENTS ON LANDSLIDE OCCURRENCE UNDER CHANGING CLIMATE IN EARTHQUAKE-PRONE CORDILLERA BLANCA, PERU

Comentarios sobre la Ocurrencia de Deslizamientos de Tierra bajo el Cambio Climático en la Cordillera Blanca, una Zona Propensa a Terremotos, Perú

Jan Klimeš¹ and Adam Emmer²

¹The Czech Academy of Sciences, Institute of Rock Structure and Mechanics, Prague, Czech Republic

²Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, Austria

Abstract

Landslides are among the major landscape forming processes in mountain regions like the Cordillera Blanca in the Ancash region, Peru. They include a wide variety of types with specific movement dynamics ranging from slow-moving landslides to debris flows and extremely rapid ice-rock avalanches. They are commonly triggered by extreme precipitation and temperature driven processes. Climatological analyses in the Cordillera Blanca suggest a warming trend in the 20th and early 21st centuries, resulting in accelerated glacier ice loss that alters the slope stability conditions. Regardless of the scenario considered, climate predictions agree on the continuation of warming, which may be especially profound in the highest altitudes (> 5000 m a.s.l.). Besides the climate-driven landslides, historical earthquakes triggered a large number of landslides, ranking among the most frequent landslide trigger in the region. In addition, the seismic effects on rocks may set more favorable preconditions for future landslides. However, the predictability of a strong earthquake occurrence is limited. Under such complex natural conditions and landslide hazard drivers, it is important to keep in mind that future landslide risk could also be managed by lowering exposure and vulnerability of possibly affected communities. Mitigation of these risk components entirely depends on our (i.e., human) decisions. Therefore, our contemporary decisions will largely determine future landslide risk, which underlines our responsibility for future landslide disaster occurrence.

Keywords: *Landslides, climate, precipitation, earthquake, Cordillera Blanca, risk reduction*

Resumen

Los deslizamientos de tierra se encuentran entre los principales procesos de formación del paisaje en regiones montañosas como la Cordillera Blanca en la región de Ancash, Perú. Incluyen una amplia variedad de tipos con dinámicas de movimiento específicas que van desde deslizamientos de tierra de movimiento lento hasta flujos de escombros y avalanchas de rocas y hielo extremadamente rápidas. Suelen desencadenarse por precipitaciones extremas y procesos impulsados por la temperatura. Los análisis climatológicos en la Cordillera Blanca sugieren una tendencia al calentamiento en el siglo XX y principios del XXI, lo que resulta en una pérdida acelerada de hielo de los glaciares que altera las condiciones de estabilidad de las laderas. Independientemente del escenario considerado, las predicciones climáticas coinciden en la continuación del calentamiento, que puede ser especialmente profundo en las altitudes más elevadas (> 5000 m s.n.m.). Además de los deslizamientos de tierra provocados por el clima, los terremotos históricos desencadenaron una gran cantidad de deslizamientos de tierra, clasificándose entre los desencadenantes de deslizamientos de tierra más frecuentes en la región. Además, los efectos sísmicos sobre las rocas pueden establecer condiciones previas más favorables para futuros deslizamientos de tierra. Sin embargo, la previsibilidad de la ocurrencia de un fuerte terremoto es limitada. Bajo condiciones naturales tan complejas y factores de riesgo de deslizamientos de tierra, es importante tener en cuenta que el riesgo futuro de deslizamientos de tierra podría gestionarse también reduciendo la exposición y la vulnerabilidad de las comunidades posiblemente afectadas. La mitigación de estos componentes de riesgo depende completamente de nuestras decisiones (es decir, humanas). Por lo tanto, nuestras decisiones contemporáneas determinarán en gran medida el riesgo futuro de deslizamientos de tierra, lo que subraya nuestra responsabilidad por la ocurrencia de futuros desastres por deslizamientos de tierra.

Palabras clave: *Derrumbes, clima, precipitación, terremoto, Cordillera Blanca, reducción de riesgo*

Introduction

The occurrence of landslides in high glaciated mountains is influenced by a wide range of interrelated factors acting on different spatial and temporal scales. Among the climatically driven processes responsible for landslide initiation are permafrost degradation (Schneider et al., 2014; Coe et al., 2018), mountain glacier recession and thinning (Kos et al., 2016; Dussaillant et al., 2019; Emmer et al., 2020a), as well as effects of stress redistribution within the slopes due to the repeated cycle of loading and unloading (e.g., Hugenholtz et al., 2008; McColl, 2012). A complex interplay between passive settings (e.g., morphological, geological and structural) and climatically driven glacier development (Holm et al., 2004; Klimeš et al., 2021) has been described to result in a non-linear relationship between slope and climate-glacier systems (Holm et al., 2004; Huggel et al., 2012).

The internal Earth forces driving tectonic and seismic processes in the high mountains increase the complexity of slope stability. Tectonic movements affect landslide occurrences through high relief development where the slope processes represent significant forces to accommodate the relief energy (Korup, 2005). The earthquakes trigger a wide range of slope failures (Kampherm, 2009), ranging from very deep, mountain-scale deformations (Pánek and Klimeš, 2016), extremely rapid and large avalanches (Plafker et al., 1971) to extremely large numbers of landslides of different magnitudes (Jibson et al., 2004; Roback et al., 2018). At the same time, seismic shaking contributes to progressive slope stability deterioration through repeated seismic loading (Lacroix et al., 2015; Gischig et al., 2016).

This article describes basic landslide types in the Cordillera Blanca and their occurrence patterns related to earthquakes and climate as major hazard drivers in the region. It comments on the exposure and vulnerability as major landslide risk components, which need to be mitigated within the landslide risk reduction effort. It also outlines possible future developments of the landslide hazard, which should be considered for risk reduction practices, since only our current decisions may effectively reduce the risk of future landslide disasters.

Methods and Data

The Cordillera Blanca and Previous Landslide Research

The Cordillera Blanca (Figure 1) attracts global scientific interest since it is the world's largest, glaciated tropical mountain range with decadal history of glacier-related hazards mitigation practice (Emmer et al., 2020b). It is formed by a granitic batholith emplaced in Jurassic sediments, limited from the west by the more than 200 km long and morphologically distinct Cordillera Blanca fault. Nevertheless, the major seismicity source in the region is the subduction process of the Nazca plate beneath the South American tectonic plate (Tavera, 2014),

which was also responsible for the occurrence of the most devastating historical earthquake in 1970 (Plafker et al., 1971). The region has high probability of occurrence of earthquakes reaching shaking intensities greater than VII MMI (Modified Mercalli Intensity; Petersen et al., 2018).

The tropical mountain climate is characterized by low annual and high diurnal temperature amplitudes (Kasser et al., 1990) with the distinct precipitation pattern of rainy (October–April, about 90% of annual precipitation) and dry seasons (May–September). The glaciation of the Cordillera Blanca had two significant advances during the Little Ice Age (LIA) - between 1590–1720 and 1790–1880 (Thompson et al., 2000; Rabatel et al., 2013) followed by a retreat interrupted by a short period of re-advance in the 1920s (Georges, 2004). As a result, the glacier cover was significantly reduced to only 54% of the 1930 area in 2010 (cf. 480 km²; Burns and Nolin, 2014).

Socio-economic development of the Cordillera Blanca and surrounding valleys (e.g., tourist infrastructure, agriculture, hydropower generation) often increases exposure to the landslide hazard (Huggel et al., 2020). At the same time, community individualization, loss of local knowledge and their capacity to handle changing climatic conditions, contribute to increased vulnerability of the local communities (Bury et al., 2011; Hofflinger et al., 2019). All these processes call for implementation of effective landslide risk mitigation measures at different administrative levels with focus on individual communities as the ultimate beneficiaries.

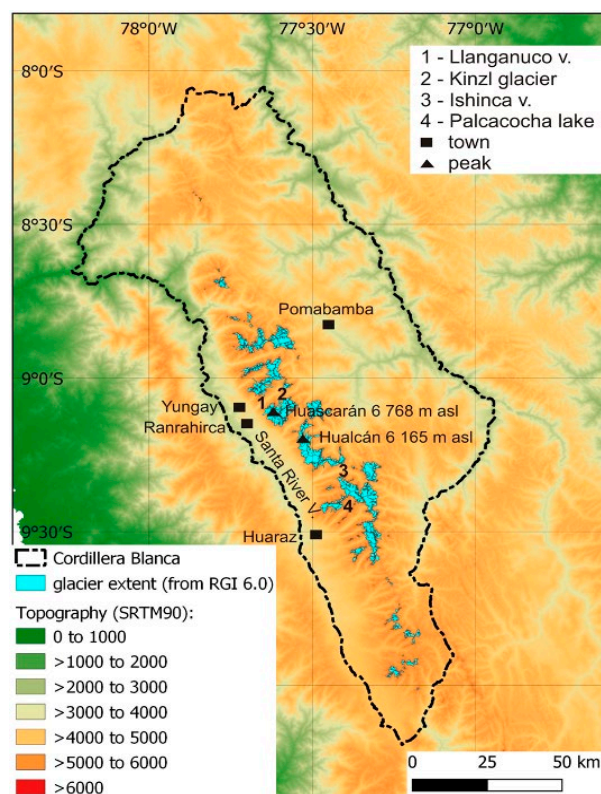


Figure 1. Cordillera Blanca and its surroundings with sites mentioned in the text (v. – valley).

Different types of landslides are found in the Cordillera Blanca, ranging from slow moving (cm/yr), deep-seated landslides (Klimeš et al., 2021) to debris flows and extremely rapid (up to 85 m/s, Evans et al., 2009) ice-rock avalanches (Figure 2). Dynamics of these landslides are generally not known due to the lack of movement monitoring data, but they most likely vary from gradual movements to episodic one-off events as suggested by results of the InSAR observations (Strozzi et al., 2018). Spatial clusters of landslide occurrence of different types can be observed in various environments, elevational bands and morphoclimatic zones. For example, piedmont areas predominantly formed from the various deposits of Quaternary age are subject to slides and debris flows often related to anthropogenic activities (e.g., road construction, irrigation practices). The highest elevations formed by glacierized rocks with permafrost conditions are the source of rock- and ice-rock avalanches with possibly long run-out distances.

The mountain range-wide information on recent landslide occurrences was collected at the scale of 1:50,000 using publically available data sources and limited field mapping (Zavala Carrión et al., 2009). The GIS based shallow landslide susceptibility models of the large part of the Cordillera Blanca lead to reasonable results even with the scarce model input data (Bueechi et al., 2018). Landslides responsible for damming recent or

pre-historical lakes were inventoried and researched by (Vilímek et al., 2015; Emmer and Juricová, 2017; Tacconi Stefanelli et al., 2018). Other landslide studies focused on significant landslide event inventories (Plafker et al., 1971; Kampher, 2009), river-basin landslide mapping (Klimeš et al., 2014) or site-specific investigations (e.g., Evans et al., 2009). They focused on lake outbursts triggered by rock-ice avalanches (Klimeš et al., 2014; Schneider et al., 2014; Frey et al., 2018; Mergili et al., 2020) or landslides from moraines (Klimeš et al., 2016; Emmer, 2017; Mergili et al., 2018) stressing the chain of processes resulting in potentially highly hazardous events (Figure 3). Only a limited number of studies paid in-depth attention to slope stability conditions (Hubbard et al., 2005) and their changes throughout the glaciation history (Klimeš et al., 2016; Klimeš et al., 2021).

Observed Climate Trends and Their Future Scenarios

There is a large number of studies focusing on description of the climatic forcing of glacier advances and retreats in the Cordillera Blanca, to a large extent resulting from rising temperatures (Vuille et al., 2008). The significant temperature rise (0.31 °C per decade) between 1969 and 1998 slowed down to 0.13 °C per decade during 1983–2012, when a cooling trend was detected for maximum daily temperatures, along with increasing precipitation

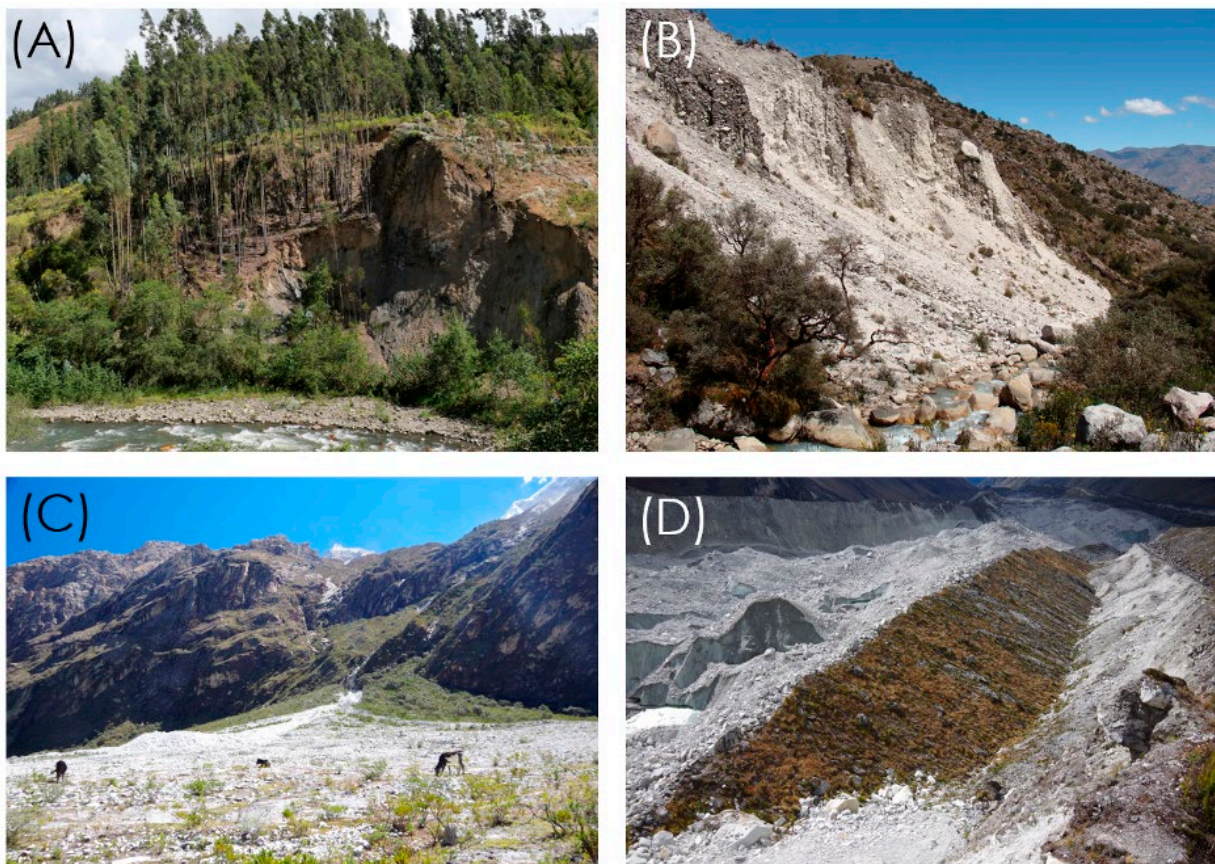


Figure 2. Examples of different types of landslides in the Cordillera Blanca. (A) shows complex slope deformation in the Pomabamba region, (B) shows poorly consolidated slopes that are subject to small-magnitude rock falls in the piedmont of the Ishinca valley, (C) shows a debris fan formed as a result of repeated depositions of material carried by earthquake- and rainfall-triggered debris flows in the Llanganuco valley, and (D) shows a displaced block of moraine material gradually sliding as a result of the thinning of the Kinzl glacier.

amounts (Schauwecker et al., 2014). The highest warming trend was identified for the colder austral winter months (JJA) and the lowest for the austral summer (DJF), i.e., during the rainy season. Some works suggest that the warming may increase further especially at higher elevations during the coldest quarter of the year (JJA) by the end of the 21st century (Urrutia and Vuille, 2009). At that time, we may also expect an elevation increase of the 0 °C isotherm, which experienced strong upward shift over the last few decades (e.g., 30 m per decade between 1960 and 2010; Rabatel et al., 2013), reaching an elevation between 4900 and 5000 m a.s.l. in recent years (Haeberli et al., 2017; Schauwecker et al., 2017). Similarly,

the global or continental-scale permafrost models assign only the highest parts of the Cordillera Blanca as probable permafrost regions (Gruber, 2012; Saito et al., 2016).

Unlike temperatures, precipitation trends are much more difficult to identify and document using the available data. The reasons are the lack of long-term, high-quality records and strong topographic effects on precipitations (Vuille et al., 2018). Furthermore, most of the precipitation variability in historical data seems to be related with ENSO (El Niño – Southern Oscillation) phenomena (Rau et al., 2016 in Vuille et al., 2018).

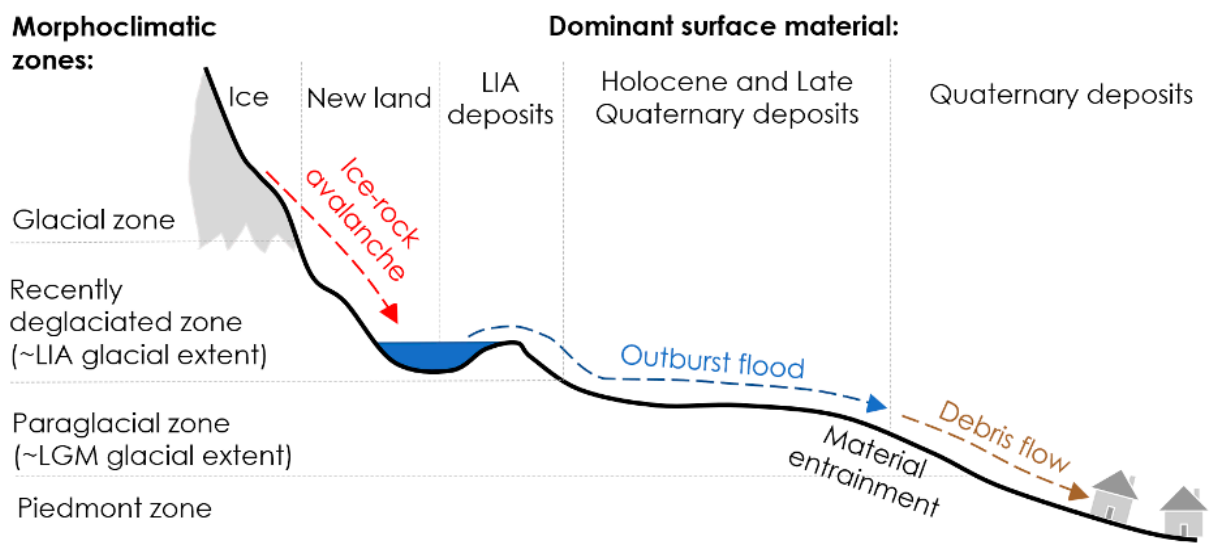


Figure 3. Schematic representation of landslide-induced process chain acting across different morphoclimatic zones. Note the process transformation from initial ice-rock avalanche into the lake (glacial to recently deglaciated zone) to outburst flood (recently deglaciated to paraglacial zone) and debris-flow (paraglacial to piedmont zone).

The LIA glacier advances created very high, probably over-consolidated moraines with steep proximal slopes highly prone to sliding during glacier retreat and thinning (Emmer et al., 2020b). Nevertheless, the glaciers have been retreating since the LIA and are lately characterized by rapid glacier retreat and thinning (Vuille et al., 2008; Rabatel et al., 2013) due to a negative mass balance, well pronounced especially since the late 1970s (Vuille et al., 2018).

Clearly, long-term climate predictions are tied with model-specific and data-specific uncertainties. A number of different predictions, using various emission scenarios, models (including different spatial resolutions) and dealing with both free-tropospheric and surface temperature change, agree on the main features of the most likely future temperature trends (Vuille et al., 2018). They include pronounced warming in the high altitudes and reduced number of frost days with increased likelihood of warm days and heat waves. On the other hand, results of the precipitation predictions largely differ from each other and do not permit drawing even general trends in the Cordillera Blanca (Vuille et al., 2018).

Results and Discussion

Climatically Driven Landslides

When assessing the effects of climate on landslide occurrences in high mountains, it is important to consider spatial distribution of liquid and solid precipitation, which is generally determined by the 0 °C isotherm altitude (i.e., the freezing level). Slopes below this altitude receive mostly liquid precipitation, while above this altitude there is usually snow. The above described warming trends (including predictions of increasing number of heat waves) and altitudinal increase of the 0 °C isotherm will most likely result in warmer conditions enhancing permafrost degradation and resulting in increased number of landslides initiated from the high glaciated ridges. Such a trend has been observed in alpine environments around the world (Fischer et al., 2012; Huggel et al., 2012) and the 2010 rock-ice fall from Mt. Hualcán (with the source area at approximately 5400 m a.s.l.; Carey et al., 2012; Vilínek et al., 2015) represents a type of landslide which may occur more frequently in the future.

At the same time, it is necessary to consider snow and ice melt from retreating glaciers in the upper parts of mountain ridges as sources of water recharge for the lower portions of the slopes. Increased underground water levels may either contribute to deterioration of the rock quality or saturate the slope, shifting its stability closer to the threshold value, resulting into general conditions favoring the occurrence of landslides.

Prominent morphoclimatic zones prone to the occurrence of landslides and the amplification and attenuation of landslide process chains are recently (i.e., post-LIA) deglaciated areas, which account for approximately 400 km² in the Cordillera Blanca (i.e., about 3% of the total area), with potential for further expansion as glaciers continue to retreat. The key factors which make these areas suitable for the occurrence of landslides are topographical and geological predispositions on the one hand (presence of steep slopes, presence of young and unconsolidated glacial deposits) and generally high dynamics of changes on the other (retreating glaciers causing stress redistribution within the rock slopes, exposure of previously glaciated land surfaces, formation and evolution of new lakes, location and upward shift of the 0 °C isotherm and permafrost degradation). As a result, numerous mass wasting processes originate from these morphoclimatic zones, making them hotspots. These processes include snow avalanches, ice avalanches associated with a disintegration of retreating glaciers, ice-rock avalanches associated with permafrost degradation (Gruber and Haeberli, 2007; Schneider et al., 2014; Haeberli et al., 2017) and landslides in unconsolidated and over-steepened moraine material (Klimeš et al., 2016; Emmer et al., 2020a). Landslide initiations from these zones are expected to increase in the future due to increasing temperatures.

The presence and involvement of glacial lakes play a specific role in the process chain evolution and dynamics. While the majority of landslides originating from the glacial zone or recently deglaciated zone are also deposited within these zones, glacial lakes may release retained water and substantially increase the mobility and reach of the process chain when hit by a landslide (see Figure 3). These events involving glacial lakes are termed glacial lake outburst floods (GLOFs) and are particularly common in the Cordillera Blanca. Many GLOFs are documented to have occurred there since the LIA (Emmer et al., 2022), the majority of which were triggered by various types of landslides. While several high magnitude GLOFs originating from failures of moraine dams in late 1930s to early 1950s were associated with ice-related triggering (ice avalanches, calving processes), recent events were often triggered by landslides in moraines and rockslides (Emmer et al., 2020b). This has shown that even a moderate-magnitude (< 1Mm³) landslide in lake-surrounding moraines can initiate a process chain reaching far from the source area (Mergili et al., 2018).

Importantly, recently deglaciated zones also functionally connect settled piedmont zones with shrinking glacial zones. This interaction has led to numerous disasters in the past, of which many are attributed to landslides and landslide-induced process chains (Carey, 2005; Carey, 2010). The number of historical landslides attributed to precipitation (e.g., Vilímek et al., 2005; Emmer et al., 2014; Klimeš et al., 2021) strongly suggests that rainfall will continue to trigger landslides in the Cordillera Blanca. Nevertheless, their historical occurrence suggests that they will probably not represent the most frequent landslide trigger. An overview of landslides and debris flows, registered in the DesInventar database for the Ancash region between 1971 and 2009, showed 399 events where the triggering was enhanced by three strong and extreme El Niño events (Vilímek et al., 2012). Even when considering significant underreporting of events in this database, which may reach 100% (Jacobs et al., 2019), the rainfall-triggered landslides recorded in the Ancash region over several decades represent just a small part of the “thousands of landslides” mapped after the 1970 earthquake (Plafker et al., 1971). These data suggest that earthquakes play the key role in terms of number of triggered landslides, but such a conclusion is based only on very limited observation time and should be considered with caution, especially when considering future development. In addition, the link drawn between past landslides and precipitation is mostly indirect due to sparse rainfall gauge coverage of the Cordillera Blanca.

Earthquake-triggered Landslides

Cordillera Blanca is among the regions with very high seismic hazard (Petersen et al., 2018) and where tens or thousands of landslides were caused by the 1946 (Kampherm, 2009) and 1970 (Plafker et al., 1971) earthquakes. Furthermore, positive feedback of the co-seismic landslides to future landslide hazard needs to be considered. A significant increase in the occurrence of the rainfall-induced landslides has been linked to the co-seismic landslides initiated during the Grohka 2015 earthquake (Rosser et al., 2021) and rainfall thresholds of debris flows had been substantially lowered after the 1999 Chi-Chi earthquake on Taiwan, resulting in their abundant occurrence in subsequent years (Lin et al., 2004). On a local scale, another effect of seismic shaking is progressive weakening of slope strength through repeated seismic loading of rock fractures. This has been described from other areas in Peru (Lacroix et al., 2015) and hypothesized for some landslide cases that occurred after the 1970 Ancash earthquake (Klimeš et al., 2021). These findings underline the complexity of landslide occurrence in glaciated and seismically active regions such as the Cordillera Blanca, limiting straightforward predictions of future landslide initiation patterns.

Landslide Related Disasters Are Not Natural Phenomena

Landslides represent an important landscaping and environmental phenomena (e.g., sediment transport,

surface morphology formation, species expansion, increasing habitat diversity; García-Olivares et al., 2017; Šímová et al., 2019). They are traditionally and probably most often investigated by the earth science disciplines, although the main aim of their studies - landslide risk reduction - largely belongs to the scope of social sciences. The investigation of their social or cultural aspects is often overlooked or strongly limited, resulting in the perception of landslides-related disasters as natural, thus inevitable in their origin. Such perception may strongly determine the preferred mitigation options, which are often focused on technical measures reducing the landslide hazard, largely neglecting any possible changes of the exposure and vulnerability of local people (UNISDR, 2009). Nevertheless, none of the disasters related to landslides (e.g., Schuster and Highland, 2007) should be considered as natural in their cause. The reason is that landslides are inherited property of landscape development occurring throughout the Earth's geological history, while decisions to place vulnerable assets into high landslide hazard areas have always been entirely human decisions. The fact that in many cases such decisions were unintentional or based on incomplete knowledge about landslide occurrences and propagation mechanisms does not reduce human responsibility for disaster occurrences (Kelman, 2020). Unlike the processes and conditions responsible for landslide initiation and their magnitude (e.g., precipitation, seismic shaking, structural and lithological rock properties and relief characteristics), exposure and vulnerability are entirely under human control and their proper management may effectively mitigate landslide disaster risk (Figure 4).

The extreme difficulty in correctly comprehending and reflecting relationships between landslides and society in effective disaster risk reduction measures is well illustrated by the repeated (cf. 1962, 1970) ice-rock avalanches from the north peak of the Mt. Huascarán (6768 m a.s.l.). The two events claimed together about 7000 lives (Evans et al., 2009) in areas previously affected by Pleistocene avalanches (Plafker and Ericksen, 1978; Valderama et al., 2008). The 1962 event impacts were spatially limited to the Ranrahirca village and surrounding small settlements, claiming about 1000 lives (Evans et al., 2009). The following seismically triggered and larger avalanche in 1970 resulted in 97 deaths within the re-occupied territory of the Ranrahirca village (Clapperton and Hamilton, 1971) and claimed another 5000 to 6000 lives during the destruction of the nearby town of Yungay (Oliver-Smith, 1986; Evans et al., 2009). Calculations of historical risk values considering population density and ice-rock hazard levels before 1962 and 1970 events resulted in both cases being classified in the unacceptable high risk category as defined by criteria in Fell et al. (2005). After the 1970 ice-rock avalanche, it was decided to rebuild Yungay and Ranrahirca just outside the 1970 avalanche limits, lowering population exposure to potential future events. Nevertheless, recent urbanization and expansion, along with re-occupation of areas directly affected by the 1962 and 1970 avalanches, contribute to

the increase of ice-rock avalanche risk shifting to the unacceptable high risk category (Fell et al., 2005). There is no straightforward and easy way to implement how to avoid such an undesirable landslide risk increase caused by social development.

This example illustrates how important is the identification of areas that were subject to hazardous slope events in historical or pre-historical times. It can be done through historical landslide inventories, which combine geomorphological and historical research, e.g., study of remote sensing imageries, documentary data sources, indigenous knowledge, etc. (Guzzetti et al., 2012; Klimeš et al., 2019) and may provide the best available information for future landslide hazard assessment. Remotely sensed data proved to be highly applicable for compiling landslide inventories in the Cordillera Blanca (Strozzi et al., 2018) and their future use should be of the highest priority. Such a scientific effort may be complemented by information collected directly from the local population through interviews (Klimeš et al., 2019) or via participative approaches using web or mobile application platforms (Juang et al., 2019; Jacobs et al., 2019). Involvement of the general public may not only increase reliability of the landslide inventory, but could strongly contribute to future acceptance of mitigation measures suggested by the experts by bridging the “public – authorities – science” gap. At the same time, local hazard or risk studies, which include public dissemination of hazard maps and designation of evacuation routes, may decrease vulnerability of the exposed population (Klimeš et al., 2019; Huggel et al., 2020).

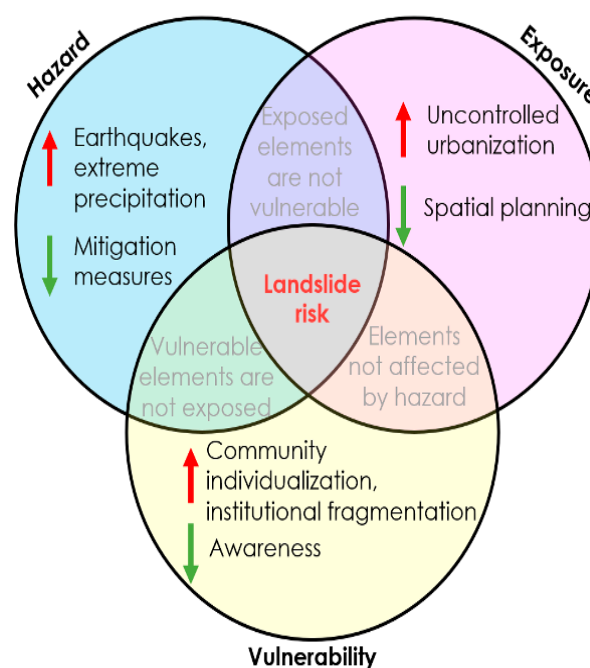


Figure 4. Key components of landslide risk – hazard, exposure and vulnerability. Each component has drivers increasing (red arrow) or decreasing (green arrow) impacts on resulting landslide risk. Note that only selected drivers are listed in the scheme.

Attribution of the Future Cordillera Blanca Landslides to Anthropogenic Climate Change

Human activities have long been important landslide preparatory factors as well as triggering factors responsible for a number of the deadliest landslide events (e.g., Kilburn and Petley, 2003; Franks et al., 2021). Furthermore, recent data show that the share of fatal landslides that are related to human activities (e.g., constructions, mining) increases worldwide (Froud and Petley, 2018). In the above mentioned cases, it is straightforward to attribute the landslide occurrence to human intervention. On the other hand, searching the link between effects of anthropogenic climate change and landslide occurrences or movement accelerations, is intrinsically complex. In most of the cases, it would require linking the specific extreme triggering event (e.g., precipitation, heat wave) with anthropogenic climate change. So far, this is very difficult for small regions or specific sites, while at the scale of general climate scenarios it is well established (Huggel et al., 2016). It is also true for the Cordillera Blanca, where the likely future climate developments result in more favorable conditions for landslide occurrences in the glacial zone (Figure 3). Nevertheless, some recent studies succeed in directly linking effects of long-term climate trends to mountain glacier recession at the local scale (Stuart-Smith et al., 2021). The authors argue that without the human-induced warming, the Palcacocha glacier lake would not be in its recent state, e.g., free of glacier and containing a large amount of water. Some documented landslides show very close coupling between glacial retreat/thinning and measured movement velocities or landslide initiations (e.g., Kos et al., 2016). In such cases, it may be possible to make a direct link between human-induced mountain glacier degradation and landslide activity, providing solid arguments to attribute specific landslide occurrence to the long-term, human-induced climate change. Nevertheless, in many cases, including Lake Palcacocha, the direct attribution is difficult due to documented lag time between deglaciation and landslide activity (e.g., Klimeš et al., 2021) as well as complex relationships among mountain glacier retreat and landslide occurrences at a regional scale (Holm et al., 2004). In the case of Lake Palcacocha case, the 2003 moraine landslide, which caused a minor lake outburst flood, was chiefly governed by specific underground water recharge conditions, which could not be unambiguously linked to processes caused by human-induced climate change. In addition, the slope remained stable for several decades after it lost effective glacier support (Klimeš et al., 2016), thus the direct attribution of this landslide to glacier downwasting is more difficult to make.

The recent political and social developments (Huggel et al., 2016; Huggel et al., 2020) along with attribution studies (e.g., Stuart-Smith et al., 2021) strongly support claims for compensation for negative impacts of climate change based on normative justice principles (Huggel et al., 2016). Therefore, there may be more legal cases similar to the *Lliuya vs. RWE AG* one over increased hazard

from Lake Palcacocha (Huggel et al., 2020), especially for highly damaging landslides (e.g. rock avalanches). These originate from the glaciated mountain peaks and are capable of causing enormous damage far from the source areas (e.g., the 2021 Chamoli disaster; Shugar et al. 2021; the 2016 repeated glacier collapses; Käab et al., 2018). Nevertheless, we urge the global research community to focus on an alternative approach to global climatic justice represented by the ability to assist principle (AAP, Huggel et al., 2016). It assigns responsibilities for solving negative impacts of climate change proportional to economic, technological and logistic capacities. Different mechanisms exist to meet these responsibilities including programs to strengthen preparedness and institutions responsible for risk management or technology transfer (Huggel et al., 2016), which can be applied by scientists and research institutes (compare with Sassa, 2015). This approach is thought to be more plausible and feasible when projected climate change calls for immediate help and when the party responsible for the impact is not able to provide full recovery (Huggel et al., 2016).

Concluding Remarks

The Cordillera Blanca is host to various types of landslides in diverse morphoclimatic zones where their occurrence is associated with earthquakes and precipitation extremes. Both of these triggers exhibit no clear trend in the past and, therefore, their future frequencies are highly uncertain, strongly limiting hazard prediction in most of the region. On the other hand, a clear warming trend is shown by historical data and further temperature increase is also expected by a number of recent studies. These conditions and the associated glacier retreat and permafrost degradation may lead to the increased occurrence of landslides in spatially limited glacial and recently deglaciated zones. As illustrated by the historical examples, landslides originating from these zones are capable of acting across morphoclimatic zones and impact relatively distant settled piedmont areas, especially when glacial lakes are involved in the process chains. Therefore, the landslide hazard is supposed to increase in the recently deglaciated and deglaciating glacial zones. Other risk components (e.g., exposure and vulnerability) may be profound landslide risk drivers in the region, possibly increasing landslide risk even in areas where there is no apparent change of landslide hazard (e.g., piedmont zones).

Climatic observations covering higher altitudes as well as site specific or regional slope stability assessments are needed to properly understand the future landslide hazard in the region. Furthermore, a geomorphological and historical approach for compiling landslide inventories is recommended as an effective way to correctly identify areas most prone to the future landslide occurrences. The high applicability of information derived from remotely sensed data and provided by the local population should be strongly reflected when preparing the landslide inventories. At the same time, to reduce landslide disaster

risk under such complex environmental conditions, it is necessary to include cultural and social aspects in exposure and vulnerability studies. It reflects the fact that landslide disasters are not caused by natural phenomena, but by human decisions to expose vulnerable objects to high landslide hazard. Therefore, lowering vulnerabilities and exposure should be stressed in the future landslide risk management approaches.

Acknowledgements

The authors acknowledge the Inter-Vector LTV19014 project of the Czech Ministry of Education, Youth and Sports and the RCUK-CONICYT Glacial Lakes of Peru (GLOP) project for the support.

References

- Bueechi, E., Klimeš, J., Frey, H., Huggel, C., Strozzi, T. and Cochachin, A. (2019). Regional-scale landslide susceptibility modelling in the Cordillera Blanca, Peru - A comparison of different approaches. *Landslides*, 16, 395-407.
- Burns, P. and 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.
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A. and Gómez López, R. J. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105, 179-206.
- Carey, M. (2005). Living and dying with glaciers: People's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 47(2-4), 122-134.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. New York, Oxford University Press.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haerberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climate Change*, 112 (3-4), 733-767.
- Clapperton, C. M. and Hamilton, P. (1971). Peru beneath its eternal threat. *The Geographical Magazine*, 43, 632-639.
- Coe, J. A., Bessette-Kirton, E. K. and Geertsema, M. (2018). Increasing rock-avalanche size and mobility in Glacier Bay National Park and Preserve, Alaska detected from 1984 to 2016 Landsat imagery. *Landslides*, 15, 393-407.
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. and Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12, 802-808.
- Emmer, A. (2017). Geomorphologically effective floods from moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 177, 220-234.
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. and Cochachin, A. (2014). Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca, Peru. In Shan, W., Guo, Y., Wang, F., Marui, H. and Strom, A. (Eds.), *Landslides in cold regions in the context of climate change*, (Environmental science and engineering, chap. 17) 231-252. Cham, Switzerland, Springer.
- Emmer, A. and Juřicová, A. (2017). Inventory and typology of landslide-dammed lakes of the Cordillera Blanca (Peru). In Mikoš, M., Vilímek, V., Yin, Y. and Sassa, K. (Eds.), *Advancing culture of living with landslides - WLF 2017*, 5 (Landslides in different environments), 259-266. Cham, Switzerland, Springer.
- Emmer, A., Klimeš, J., Hölbling, D., Abad, L., Draebing, D., Skalák, P., Štěpánek, P. and Zahradníček, P. (2020a). Distinct types of landslides in moraines associated with the post-LIA glacier thinning: Observations from the Kinzl Glacier, Huascarán, Peru. *Science of the Total Environment*, 739, 139997. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139997
- Emmer, A., Harrison, S., Mergili, M., Allen, S., Frey, H. and Huggel, C. (2020b). 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 365, 107178. doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107178
- Emmer, A., Wood, J. L., Cook, S. J., Harrison, S., Wilson, R., Diaz-Moreno, A., Reynolds, J. M., Torres, J. C., Yarleque, C., Mergili, M., Jara, H. W., Bennett, G., Caballero, A., Glasser, N. F., Melgarejo, E., Riveros, C., Shannon, S., Turpo, E., Tinoco, T., ... and Poma, C. (2022). 160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 208, 103722. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103722
- Evans, S. G., Bishop, N. F., Fidel Smoll, L., Valderrama Murillo, P., Delaney, K. B. and Oliver-Smith, A. (2009). A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108(1-2), 96-118.
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S. and Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In Hungr, O., Fell, R. Couture, R. and Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide risk management*, 3-26. London, Taylor and Francis.
- Fischer, L., Purves, R. S., Huggel, C., Noetzli, J. and Haerberli, W. (2012). On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 241-254.
- Franks, D. M., Stringer, M., Torres-Cruz, L. A., Baker, E., Valenta, R., Thygesen, K., Matthews, A., Howchin, J. and Barrie, S. (2021). Tailings facility disclosures reveal stability risks. *Scientific Reports*, 11, 5353. doi.org/10.1038/s41598-021-84897-0
- Frey, H., Huggel, C., Chisolm, R. E., Baer, P., McArdell, B., Cochachin, A. and Portocarrero, C. (2018). Multi-source glacial lake outburst flood hazard assessment and mapping for Huaraz, Cordillera Blanca, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 6, 210. doi: 10.3389/feart.2018.00210
- Froude, M. J. and Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Science*, 18(8), 2161-2181.
- García-Olivares, V., López, H., Patiño, J., Alvarez, N., Machado, A., Carracedo, J. C., Soler, V. and Emerson, B. C. (2017). Evidence for mega-landslides as drivers of island colonization. *Journal of Biogeography*, 44(5), 1053-1064.
- Georges, C. (2004). 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36(1), 100-107.
- Gischig, V., Preisig, G. and Eberhardt, E. (2016). Numerical investigation of seismically induced rock mass fatigue as a mechanism contributing to the progressive failure of deep-seated and slides. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(6), 2457-2478.

- Gruber, S. (2012). Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6(1), 221-233.
- Gruber, S. and Haeberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112 (F2), F02S18. doi:10.1029/2006JF000547
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. and Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.
- Haeberli, W., Schaub, Y. and Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293(Part B), 405-417.
- Hofflinger, A., Somos-Valenzuela, M. A. and Vallejos-Romero, A. (2019). Response time to flood events using a social vulnerability index (ReTSVI). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 251-267.
- Holm, K., Bovis, M. and Jakob, M. (2004). The landslide response of alpine basins to post-Little Ice Age glacial thinning and retreat in southwestern British Columbia. *Geomorphology*, 57(3-4), 201-216.
- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J. M., Quincey, D., Richardson, S. D., Zapata-Luyo, M., Santillan-Portilla, N. and Hambrey, M. J. (2005). Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(10), 1251-1264.
- Hugenholtz, C. H., Moorman, B. J., Barlow, J. and Wainstein, P. A. (2008). Large-scale moraine deformation at the Athabasca Glacier, Jasper National Park, Alberta, Canada. *Landslides*, 5, 251-260.
- Huggel, C., Clague, J. J. and Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1), 77-91.
- Huggel, C., Wallimann-Helmer, I., Stone, D. and Cramer, W. (2016). Reconciling justice and attribution research to advance climate policy. *Nature Climate Change*, 6, 901-908.
- Huggel, C., Carey, M., Emmer, A., Frey, H., Walker-Crawford, N. and Wallimann-Helmer, I. (2020). Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: Local and global drivers and responsibilities for the case of Lake Palcacocha, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2175-2193.
- Jacobs, L., Kabaseke, C., Bwambale, B., Katutu, R., Dewitte, O., Mertens, K., Maes, J. and Kervyn, M. (2019). The geo-observer network: A proof of concept on participatory sensing of disasters in a remote setting. *Science of the Total Environment*, 670, 245-261.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., Schulz, W. and Keefer, D. K. (2004). Landslides triggered by the 2002 Denali fault, Alaska earthquake and the inferred nature of the strong shaking. *Earthquake Spectra*, 20(3), 669-691.
- Juang, C. S., Stanley, T. A. and Kirschbaum, D. B. (2019). Using citizen science to expand the global map of landslides: Introducing the Cooperative Open Online Landslide Repository (COOLR). *PLoS ONE*, 14(7), e0218657. doi.org/10.1371/journal.pone.0218657
- Kääb, A., Leinss, S., Gilbert, A., Bühler, Y., Gascoin, S., Evans, S. G., Bartelt, P., Berthier, E., Brun, F., Chao, W.-A., Farinotti, D., Gimbert, F., Guo, W., Huggel, C., Kargel, J. S., Leonard, G. J., Tian, L., Treichler, D. and Yao, T., (2018). Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nature Geoscience*, 11, 114-120.
- Kampher, T. S. (2009). *Landslides triggered by the 1946 Ancash earthquake (Peru) and geologic controls on the mechanisms of initial rock slope failure*. Master theses (pp. 126). Waterloo, Canada, University of Waterloo. <http://hdl.handle.net/10012/4233>
- Kasser, G., Ames, A. and Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136-140.
- Kelman, I. (2020). *Disaster by choice: How our actions turn natural hazards into catastrophes*. Oxford University Press.
- Kilburn, C. R. J. and Petley, D. N. (2003). Forecasting giant, catastrophic slope collapse: Lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology*, 54(1-2), 21-32.
- Klimeš, J., Benešová, M., Vilímek, V., Bouška, P. and Cochachin Rapre, A. (2014). The reconstruction of a glacial lake outburst flood using HEC-RAS and its significance for future hazard assessments: An example from Lake 513 in the Cordillera Blanca, Peru. *Natural Hazards*, 71, 1617-1638.
- Klimeš, J., Novotný, J., Novotná, I., Jordán de Urries, B., Vilímek, V., Emmer, A., Strozzi, T., Kusák, M., Cochachin Rapre, A., Hartvich, F. and Frey, H. (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: Example of the Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*, 13(6), 1461-1477.
- Klimeš, J., Rosario, A. M., Vargas, R., Raška, P., Vicuña, L., Jurt, C. (2019). Community participation in landslide risk reduction: A case history from Central Andes, Peru. *Landslides*, 16, 1763-1777.
- Klimeš, J., Novotný, J., Cochachin Rapre, A., Balek, J., Zahradníček, P., Strozzi, T., Sana, H., Frey, H., René, M., Štěpánek, P., Meitner, J. and Junghardt, J. (2021). Paraglacial rock slope stability under changing environmental conditions, Safuna Lakes, Cordillera Blanca, Peru. *Frontiers in Earth Science*, 9:607277. doi: 10.3389/feart.2021.607277
- Korup, O. (2005). Large landslides and their effect on sediment flux in South Westland, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(3), 305-323.
- Kos, A., Amann, F., Strozzi, T., Delaloye, R., von Ruette, J. and Springman, S. (2016). Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch

- Glacier, Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 43(24), 12,466-12,474.
- Lacroix, P., Berthier, E. and Taïpe Maquerhua, E. (2015). Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca Valley, Peru, detected from Pleiades images. *Remote Sensing of the Environment*, 165, 148-158.
- Lin, C.-W., Shieh, C.-L., Yuan, B.-D., Shieh, Y.-C., Liu, S.-H. and Lee, S.-Y. (2004). Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan. *Engineering Geology*, 71(1-2), 49-61.
- McCull, S. T. (2012). Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology*, 153-154, 1-16.
- Mergili, M., Emmer, A., Juřicová, A., Cochachin, A., Fischer, J.-T., Huggel, C. and Pudasaini, S. P. (2018). How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1373-1389.
- Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J.-T., Cochachin, A. and Frey, H. (2020). Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 93-114.
- Oliver-Smith, A. (1986). *The martyred city: Death and rebirth in the Andes*. Albuquerque, University of New Mexico Press.
- Pánek, T. and Klimeš, J. (2016). Temporal behavior of deep-seated gravitational slope deformations: A review. *Earth-Science Reviews*, 156, 14-38.
- Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., Mueller, C. S. and Shumway, A. M. (2018). Seismic hazard, risk, and design for South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 781-800.
- Plafker, G. and Ericksen, G. E. (1978). Nevados Huascarán avalanches, Peru. *Developments in Geotechnical Engineering*, 14(Part A), 277-314.
- Plafker, G., Ericksen, G. E. and Concha, J. F. (1971). Geological aspects of the May 31, 1970, Perú earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(3), 543-578.
- 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.
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W. and Felipe, O. (2016). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143-158.
- Roback, K., Clark, M. K., West, A. J., Zekkos, D., Li, G., Gallen, S. F., Chamlagain, D. and Godt, J. W. (2018). The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7. 8 Gorkha earthquake, Nepal. *Geomorphology*, 301, 121-38.
- Rosser, N., Kinsey, M., Oven, K., Densmore, A., Robinson, T., Pujara, D. S., Shrestha, R., Smutny, J., Gurung, K., Lama, S. and Dhital, M. R. (2021). Changing significance of landslide hazard and risk after the 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal Earthquake. *Progress in Disaster Science*, 10, 100159. doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100159.
- Saito, K., Trombotto Liaudat, D., Yoshikawa, K., Mori, J., Sone, T., Marchenko, S., Romanovsky, V., Walsh, J., Hendricks, A. and Bottegat, E. (2016). Late Quaternary permafrost distributions downscaled for South America: Examinations of GCM-based maps with observations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(1), 43-55.
- Sassa, K. (2015). ISDR-ICL Sendai partnerships 2015-2025 for global promotion of understanding and reducing landslide disaster risk. *Landslides*, 12, 631-640.
- 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. and Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85-97.
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Endries, J., Montoya, N., Neukom, R., Perry, B., Salzmann, N., Schwarb, M. and Suarez, W. (2017). The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), 5172-5189.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. and García, J. (2014). Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, 35, 145-155.
- Schuster, R. L. and Highland, L. M. (2007). The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 1-27.
- Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Vries, M., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhabri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., . . . and Westoby, M. J. (2021). A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373(6552), 300-306.
- Strozzi, T., Klimeš, J., Frey, H., Caduff, R., Huggel, C., Wegmüller, U. and Cochachin Rapre, A. (2018). Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru. *Remote Sensing of Environment*, 217, 111-125.
- Stuart-Smith, R. F., Roe, G. H., Li, S. and Allen, M. R. (2021). Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat. *Natural Geoscience*, 14, 85-90.

- Šímová, A., Pánek, T., Galka, M., Zernitskaya, V., Hájková, P., Brodská, H., Jamrichová, E. and Hájek, M. (2019). Landslides increased Holocene habitat diversity on a flysch bedrock in the Western Carpathians. *Quaternary Science Reviews*, 219, 68-83.
- Tacconi Stefanelli, C., Vilímek, V., Emmer, A. and Catani, F. (2018). Morphological analysis and features of the landslide dams in the Cordillera Blanca, Peru. *Landslides*, 15, 507-521.
- Tavera, H. (2014). *Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú*. Lima, Instituto Geofísico del Perú.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. and Henderson, K. A. (2000). Ice-core paleoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science*, 15(4), 377-394.
- UNISDR – United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2009). 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Geneva, UNISDR.
- Urrutia, R. and Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, 114(D2), D02108. doi.org/10.1029/2008JD011021.
- Valderrama, P., Fidel, L., Hermanns, R. L. and Gosse, J. (2008). Movimientos en masa del Nevado Huascarán. Actas del XVII Congreso Geológico Argentino, Jujuy, Argentina, pp. 318–319.
- Vilímek, V., Zapata Luyo, M., Klimeš, J., Patzelt, Z. and Santillán, N. (2005). Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides*, 2, 107–115.
- Vilímek, V., Hanzlík, J., Sládek, I., Šandov, M. and Santillán, N. (2012). The share of landslides in the occurrence of natural hazards and the significance of El Niño in the Cordillera Blanca and Cordillera Negra mountains, Peru. In Sassa, K., Rouhban, B., Briceno, S., McSaveney, M. and He, B. (Eds.), *Landslides: Global risk preparedness*, 133–148. Berlin, Springer.
- Vilímek, V., Klimeš, J. and Červená, L. (2015). Glacier related landforms and glacial lakes in Huascarán National Park, Peru. *Journal of Maps*, 12(1), 193-202. doi: 10.1080/17445647.2014.1000985
- Vilímek, V., Klimeš, J., Emmer, A. and Benešová, M. (2015). Geomorphologic impacts of the glacial lake outburst flood from Lake No. 513 (Peru). *Environmental Earth Sciences*, 73(9), 5233-5244.
- Vuille, M., Francou, B., Wagon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. and Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condome, T., Salzmann, N. and Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213.
- Zavala Carrión, B. L., Valderrama Murillo, P. A., Pari Pinto, W., Luque Poma, G. and Barrantes Huamán, R. (2009). *Riesgos geológicos en la Región Ancash*. Boletín 38, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Lima, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

PLATFORMING THE STORIES OF MOUNTAIN COMMUNITIES IN PERU: CLIMATE CHANGE VULNERABILITIES AND THE CASE FOR GLACIERHUB

Una Plataforma para las Historias de las Comunidades de Montaña en Perú: Las Vulnerabilidades del Cambio Climático y el Caso para GlacierHub

Lily Roberts¹ and Ben Orlove²

¹Scott Polar Research Institute, University of Cambridge, UK (lr555@cam.ac.uk / lilyroberts20@mail.com)

²School of International and Public Affairs, Columbia University, New York, U.S.A. (bso5@columbia.edu)

Abstract

Creating a space where the remarkable changes to our environment and their impacts for our people can be documented and shared is important for education and inspiring change. Specifically, the loss of iconic glaciated landscapes and the stories of those who live in symbiosis with them deserve attention. In the contemporary era, online publications and social media serve as the platform for such work. GlacierHub is an online blog, published by Columbia Climate School, which details the state of our world's glaciers and the lives of those who connect with them, in order to increase awareness of current issues facing glaciated regions, to support communities that rely on those glaciers and to promote solutions for sustainable change. The website has strong links with individuals and organizations in Peru and has published significant coverage in the region, from science, policy and culture. This article explores the work of GlacierHub in Peru for projecting the voices of mountain communities. It discusses climate adaptation in the Peruvian Andes, including the role of women for increasing resilience, and highlights unequal vulnerabilities to climate change through interviews with researchers. It also details research into perceptions of loss and damage for Peruvians, including cultural losses, damage by Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) and the impact of COVID-19. The article concludes that the work of GlacierHub provides insight into the challenges facing Peruvians as their glaciers are shrinking, provides lessons for others on adaptation to climate change, promotes the research of scientists and anthropologists, and uncovers the depth of human connection to the natural world.

Keywords: *Climate change, communication, engagement, outreach*

Resumen

Crear un espacio donde los cambios notables en nuestro ambiente y sus impactos para nuestra gente puedan documentarse y compartirse es importante para la educación y para inspirar cambios. Específicamente, merece atención la pérdida de los icónicos paisajes glaciares y las historias de quienes conviven en simbiosis con ellos. En la era contemporánea, las publicaciones en línea y las redes sociales sirven como plataforma para dicho trabajo. GlacierHub es un blog en línea, publicado por Columbia Climate School, que detalla el estado de los glaciares de nuestro mundo y las vidas de quienes se conectan con ellos, con el fin de aumentar la conciencia sobre los problemas actuales que enfrentan las regiones con glaciares, para apoyar a las comunidades que dependen de esos glaciares y promover soluciones para el cambio sostenible. El sitio web tiene fuertes vínculos con personas y organizaciones en Perú y ha publicado una cobertura significativa en la región, desde la ciencia, la política y la cultura. Este artículo explora el trabajo de GlacierHub en Perú para proyectar las voces de las comunidades de montaña. Considera la adaptación climática en los Andes peruanos, incluido el papel de las mujeres para aumentar la resiliencia, y destaca las vulnerabilidades desiguales al cambio climático a través de entrevistas con investigadores. También detalla la investigación sobre las percepciones de pérdidas y daños para los peruanos, incluidas las pérdidas culturales, los daños causados por las inundaciones provocadas por el estallido de los lagos glaciares (GLOFs) y el impacto de la COVID-19. El artículo concluye que el trabajo de GlacierHub brinda información sobre los desafíos que enfrentan los peruanos a medida que sus glaciares se reducen, brinda lecciones para otros sobre la adaptación al cambio climático, promueve la investigación de científicos y antropólogos, y descubre la profundidad de la conexión humana con el mundo natural.

Palabras clave: *Cambio climático, comunicación, compromiso, acercamiento*

Introduction

The environmental crisis in the contemporary world facilitates opportunities to use online media to showcase the causes and effects of our climate and ecological catastrophe. Glaciers offer unique insights at the present time, since they lie at the frontier of climate change and support a diverse range of populations who are differentially experiencing the impacts of glacier loss. In this article, we discuss the work of website GlacierHub in exploring the science behind changes to the cryosphere in Peru and the lives and stories of those Peruvians impacted by these changes. The article will demonstrate how GlacierHub is increasing awareness of environmental issues and supporting communities who encounter these crises.

An Overview and History of GlacierHub

GlacierHub was founded in 2014 by anthropologist Ben Orlove, a professor of International and Public Affairs currently based at Columbia's Climate School. The website began as an independent venture by Orlove, supported in part by the cooperative agreements NSF SES-0345840 and NSF SES-0951516 awarded to the Center for Research on Environmental Decisions at Columbia University in New York. In 2020, the website became part of Columbia Climate School's *State of the Planet* archive (Figure 1). Orlove has conducted extensive fieldwork in the Peruvian Andes since the 1970s, more recently studying glacier retreat, with an emphasis on water, natural hazards and the loss of iconic landscapes. His research interests coupled with a sense of urgency about climate change and the worldwide loss of glaciers provided an opening to develop the website GlacierHub.

Prior research conducted by Orlove et al. (2014) concluded that greater presence of local and indigenous voices from the Arctic and small island states on the global stage had brought these areas forward in climate change agendas and policy making, whilst a smaller presence from mountain communities had limited attention to those areas. Recognizing this gap, GlacierHub set out to support and project the voices of those impacted by the loss of glaciers by offering stories and accounts of communities and organisations working in the face of contemporary challenges brought about by glacier retreat.

In addition, GlacierHub sought to, and continues to, advance the understanding of glaciers worldwide by communicating the current scientific research in the field. The website's editors and authors closely follow the publications from peer-reviewed journals and communicate the findings for people to explore glaciers as a way of making sense of our changing world. In this way, GlacierHub offers a weekly digest of the forefront of the science related to contemporary glaciers.

The website also covers stories relating to news and politics. Recently, GlacierHub reported on COP26 (Walther, 2021), following events at the conference including *Elevating Adaptation Action in Mountains*, where ministers from mountain nations, such as Peru, alongside representatives from the International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD) advocated for the role of women, youth and indigenous people for effective mitigation and adaptation. A post on politics discussed the role of rapid glacier retreat and permafrost thaw on remote Russian High Arctic Islands for complicating geopolitical strategies in the region (Roberts, 2021b). Another unusual theme GlacierHub



Figure 1. A screenshot of the GlacierHub website landing page, hosted on State of the Planet.

has recently explored is ecological grief, the term used to describe the mourning of environmental loss, particularly that felt by glacial communities (Starovoitov, 2021).

GlacierHub attracts an international audience because of both its worldwide coverage of news and the international nature of its contributors. The majority of GlacierHub authors are students at Columbia University who come from a range of nationalities, but the website has also featured guest posts written by researchers, community members, activists and journalists from small villages in remote mountain communities to worldly recognized academic centres. In addition, GlacierHub has conducted interviews with people from more than a dozen countries in North and South America, Europe and Asia.

The website uses its social media platforms to promote its work to its followers and reach a wider audience. GlacierHub has over 1.2k followers on Twitter, and nearly 1k on Instagram (<https://www.instagram.com/glacierhub/?hl=en>). All new posts are shared to both platforms, where GlacierHub engages with other writers, researchers and professionals in the field through tags and comments. The accounts also repost other work, news and events from other sources to their platform. Some posts by GlacierHub have circulated widely and reached a large, international audience, which can be tracked with Google Analytics. The team at GlacierHub also produces a monthly newsletter *Ice Recap*, to send to their 1000 subscribers, which keeps its followers up to date on the state of the world's glaciers.

Another tool for expanding engagement to GlacierHub's content is through reposts on other websites. For example, an original post on the projected disappearance of the Quelccaya ice cap in Peru (Islam, 2018) was reposted on the news website EarthSky (EarthSky Voices, 2018), which posts daily about the cosmos and nature. The Quelccaya ice cap is the largest tropical ice cap in the world; however, a study using modelling projections found that it could completely disappear by 2050, with severe implications for water management downstream. The Byrd Polar and Climate Research Center (2017) have also reposted previous GlacierHub work, such as a story on metal pollution downstream of rapidly melting Peruvian glaciers. Discussing two theories of how glacier retreat may result in metal contamination, the post (Belew, 2017) concluded that either way the findings represent a potential threat to the health of humans and ecosystems in the Cordillera Blanca. An insightful story by Orlove (2016) following an all-female climbing team in the Andes was reposted to the Mountain Research Initiative website (s.f. [2017]). Women from Latin America and Europe took part in a two-peak ascent in the Bolivian Andes (Figure 2), achieving a mountaineering record as well as promoting exchanges between people of different cultures. GlacierHub conducted an interview with one of the climbers who was Peruvian, in which she described the significance of viewing mountains not only as a place for strong and muscular men.



Figure 2. A group of all-female climbers on Mt. Chachacomani. Photo: Griselda Moreno.

Community, Adaptation and Science in Peru

GlacierHub places great importance on projecting the voices of marginalized and minority groups and identities, as well as promoting gender equity. Bringing awareness to the lived experiences of mountain communities is key to the website's work in Peru. A collection of posts has also discussed the challenges to climate adaptation and cultural heritage for indigenous Peruvians living in glaciated landscapes, whilst another area explored by GlacierHub involves the physical science and environmental changes occurring in the region.

The first theme which GlacierHub explores deeply is that of community. One such post (Amos-Landgraf, I., 2021) examines how climate change is threatening alpaca herding, the primary source of livelihood for many of Peru's indigenous communities, which is becoming more difficult in high alpine regions as the glaciers disappear. Streamflows from glacial ice support pasture and provide drinking water for the herds. However, this water source is diminishing, and shifting seasonal patterns of rain are troubling alpaca community decisions about shifting their herds between pastures. GlacierHub interviewed anthropologist Allison Caine who conducted twenty-

two months of fieldwork in Chillca, in the region of Cusco, observing the Quechua people. Caine noticed during her research that predictable pasture rotation is essential in this community, something that is becoming irregular in the wake of climate change. Recognizing these troubles, development and adaptation programmes are active in Chillca, teaching men how to use technical herd management strategies such as herd immunization, selective breeding and modern pasture management. However, Caine observed that these projects exclude the knowledge of Quechua women (Figure 3). Women herders host unique knowledge because they are the primary caretakers and are thus closely attuned to their animals. Such insight could increase communities' resilience to climate change if their voices were included in development and adaptation discussions. Furthermore, the workshops delivered as part of these projects are taught in Spanish, a language that women do not speak. Most women only speak the indigenous language Quechua, which poses a significant barrier to inclusivity and, consequently, adaptive capacity. The research by Caine in Chillca emphasizes the necessity of including indigenous women, and more broadly minority groups, in initiatives that aim to help communities become more resilient to the effects of glacier retreat.



Figure 3. A woman from Chillca, Peru, with her daughters and their herd. Photo: Allison Caine.

Another post (O'Hara, 2021) discussing the themes of community explores the findings of research into different adaptation methods adopted by various groups within the agricultural sector of Peru (Figure 4). Faced with numerous social-ecological changes, such as water scarcity and crop loss, the research suggests that the intersection of elements of social inequality causes unequal adaptation to these challenges. Interviewing techniques were used to gain insight into the experiences of different people living in Caylloma Province due to the rapidly changing environmental and social norms. The research alluded to the same conclusion: the design of community programmes and development opportunities limit participation to Spanish-speaking men and therefore exclude women. In the Caylloma region, too, many of the inhabitants only speak Quechua. Whether it may be gender, language or migratory status that drives social inequality, increased vulnerability is inextricably linked to fewer adaptation opportunities. The research explored by GlacierHub concluded that the root issues making

marginalized groups more vulnerable to climate change could be addressed if drivers of injustice are reduced.

On the subject of adaptation, some communities are already experiencing serious losses because limits to adaptation leave some livelihoods and communities unadaptable. A post (Bouhassira, 2020) on the website explores how decisions relating to governance have significant impacts on the harms caused by far-reaching climate-related changes that cannot be adapted to. The study that GlacierHub reports on examined these changes within a Loss and Damage (L&D) framework. L&D is a climate policy mechanism that encourages taking action to prevent and address losses and damages associated with climate change, with prior knowledge of what losses and damages are in the target region. In Peru's Cordillera Blanca, there is a link missing between how both slow and sudden climate events are affecting certain areas and therefore how these impacts can be considered losses and damages. The study aimed to advance understanding of



Figure 4. A farmer ploughing his field, with Mt. Huascaran in the distance. Photo: Kate Dunbar.

the Cordillera Blanca in order to support the development of more effective adaptation and mitigation plans and thus limit loss to livelihoods and culture. Investigations found that elderly people consider the mountains and glaciers to be part of their community and the loss of this belief in the case of glacier disappearance can be framed as cultural loss. Moreover, the Cordillera Blanca has been subject to many Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) events, which caused varying degrees of destruction. Water shortages from glacial supplies threaten the livelihoods of many indigenous communities who depend on agriculture, which is predicted to cause harm to crop productivity and food security. The authors of the study concluded that seeking to understand what constitutes a loss or damage will be essential to creating effective L&D policy, something that may be invaluable in Peru when faced by the culmination of rapid climate change and numerous barriers to successful and far-reaching adaptive strategy.

GlacierHub also covered news stories relating to the COVID-19 pandemic in Peru (Orlove, 2020). When the virus first hit the country in March and April 2020, it created great concern for rose growers in the Callejón de Huaylas valley in the region of Ancash. A long growing season for roses is permitted by irrigation systems that are supported by glacial meltwater from the Cordillera Blanca. Highland flower production is also more sustainable because it draws water from surface sources rather than overexploited groundwater sources on which coastal growers depend. After lockdowns were

introduced across Peru some relief to agriculturalists was provided on May 1, when Peru's Minister of Agriculture and Irrigation announced a lifting of restrictions for the production, transport and sale of flowers and ornamental plants, considered essential activities to the nation. However, the new rules only applied to formal enterprises that were registered with the government. Smaller growers whose economic sustainability relied on local communities were unable to benefit. The sale of flowers was restricted to home delivery, which made the domestic market particularly important in the run up to national Mother's Day on 9 May. The losses from pandemic-related restrictions were estimated to total 20,000 tons of flowers, worth 15 million Peruvian soles or 4.4 million US dollars. The inequalities experienced by rose growers builds on a long history of government policies in Peru, which favor large-scale capitalized businesses, despite the important contributions by smaller farmers. For example, programs for rose growers often have application processes, which require presentation of a competitive business plan in Spanish, which acts as a barrier to entry for many. Inequalities are exacerbated when successful farms on these programs retain a large share of the profits, despite expanding local wage employment. In a time of emergency, such as through the COVID-19 pandemic which has affected all Peruvians, the case of rose growers where minority groups are once again left out of the share of benefits of public programs points towards an ongoing lack of protection of rights and an absent momentum to change this discourse.



Figure 5. Pucaranra Glacier, Lake Palcacocha, and syphons at the moraine. Photo: INDECI.

As well as community and adaptation, GlacierHub is interested in stories relating to events occurring in the physical environment and the science behind the changes we are observing. In Peru, the website has reported on important GLOF events (Orlove, 2017). In early June 2017, calving from a glacier on Mount Pucaranra released masses of ice that fell into Lake Palcacocha, triggering large waves that damaged the infrastructure in place to prevent lake outburst floods. Fortunately, the moraine dam was not over-topped, which prevented floodwaters from gushing downstream where they could have endangered many lives and damaged urban infrastructure, but the resulting waves across the lake were strong enough to damage some pipes, rendering them inoperable. Locally known as “syphons”, the pipes draw water from the lake at times of high-water level, so they act to reduce flood risk (Figure 5). In the local community, installation of the syphons had been seen as a successful application of modern technology and carried a sense of pride that the peoples were protecting themselves from dangers they had long been subject to. The Lake Palcacocha event was not unexpected by local authorities, scientists and specialists – Ancash Noticias, a regional newspaper, had reported intense solar radiation in the prior weeks, which was considered to be a partial cause of the calving events. As the glaciers shrink even further, the lake continues to expand and fill with more water, fueling a disaster waiting to happen if Palcacocha’s dam ruptures. In GlacierHub’s research for this post, it was found that most parties agree that greater investment in infrastructure to protect the areas below the lake, early warning systems and educational programs used to train the population to respond to events are seen as the best ways to mitigate the hazards presented by Lake Palcacocha. The event reported here confirms the scientific evidence for GLOFs in the area, demonstrates the weakness of existing infrastructure, and like much of the other work conducted by GlacierHub in Peru, shines light on the vulnerabilities of mountain communities.

The most recent post to shine light on the Andes was one that covered the findings published in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6), which was released in August of 2021 (Roberts, 2021a). Summarizing the latest data relating the world’s glaciers, it was found that the highest regional glacier mass losses were noted in the southern Andes, amongst other regions in Europe and Alaska. This testifies to the need to explore and raise awareness for those affected by glacier loss in such a critical region. The IPCC report also found that peak runoff for low latitude Andean glaciers, such as those in Peru, has already passed, with significant ramifications for the future of glacial water supplies for the very large populations that rely on them. GlacierHub interviewed an IPCC author for this post who explained that since previous reports, notably Assessment Report Five (AR5) and the Special Report on the Oceans and Cryosphere, the pace at which scientific studies have been conducted and research published has picked up. This provides hope that

the science behind changes to the climate and cryosphere in Peru will rapidly advance, which will ultimately inform more advanced, dynamic and successful policy decisions.

Conclusion

GlacierHub serves as a nexus between the media and a testimony for the lived experiences of mountain communities in Peru undergoing environmental and social change. The website facilitates collaboration between its authors, guest writers, interviewees and readers, to work towards the co-production of knowledge that will make progress towards its objective to increase the presence of mountain communities, indigenous peoples and minority groups on the global climate change stage. Through spreading the stories of communities and their efforts to adapt to the impacts of glacier retreat, GlacierHub can be seen to promote solutions to the problems faced, and in its support of marginalized movements, it can be viewed as participatory in advocacy and activism. The website continues to develop an international readership, including its Latin American audience, which shares a sustained common interest in the issues of high mountain areas. It is notwithstanding that the work of GlacierHub in platforming the voices of those vulnerable to the impacts of glacier loss will not be carried out by the website alone, but through the networks and alliances it creates and through which it contributes to and communicates with its readers.

References

- Amos-Landgraf, I. (2021, April 27). What climate change adaptation programs in Peru are missing: Indigenous women’s knowledge. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/04/27/what-climate-change-adaptation-programs-in-peru-are-missing-indigenous-womens-knowledge/>.
- Belew, N. (2017, December 20). Glacier retreat and trace-metal contamination in Peru. *GlacierHub*. <https://glacierhub.org/2017/12/20/glacier-retreat-trace-metal-contamination-peru/>.
- Bouhassira, E. (2020, August 26). A look at climate-caused harms unfolding in Peru’s Cordillera Blanca. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2020/08/26/climate-caused-harms-cordillera-blanca/>.
- Byrd Polar and Climate Research Center. (2017, December 1). Metal pollution and glacier melt in Peru (GlacierHub). <https://byrd.osu.edu/news/metal-pollution-and-glacier-melt-peru-glacierhub>
- EarthSky Voices. (2018, November 30). The future disappearance of Quelccaya ice cap. *EarthSky*. <https://earthsky.org/earth/future-disappearance-quelccaya-melting-ice-cap-glacier-andes/>
- Islam, N. (2018, November 22). The future disappearance of Quelccaya ice cap. *GlacierHub*. <https://glacierhub.org/2018/11/22/the-future-disappearance-of->

quelccaya-ice-cap/.

- Mountain Research Initiative. (s.f. [2017]). An all-woman climbing team in the Andes. <https://www.mountainresearchinitiative.org/news-content/latin-america/an-all-woman-climbing-team-in-the-andes>
- O'Hara, E. (2021, January 8). Combinations of marginalized identities can limit climate adaptation in Peru. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/01/08/marginalized-identities-climate-adaptation-peru/>.
- Orlove, B. (2016, October 12). An all-woman climbing team in the Andes. *GlacierHub*. <https://glacierhub.org/2016/10/12/an-all-woman-climbing-team-in-the-andes/>.
- Orlove, B. (2017, June 12). Palcacocha icefalls demonstrate hazard vulnerabilities in Peru. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2017/06/12/palcacocha-icefalls-demonstrate-hazard-vulnerabilities-in-peru/>.
- Orlove, B. (2020, May 15). A minority of Peruvian mountain farmers benefit from government pandemic programs. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2020/05/15/peru-rose-farmers-pandemic/>.
- Orlove, B., Lazrus, H, Hovelsrud, G. K. and Giannini, A. (2014). Recognitions and responsibilities: On the origins and consequences of the uneven attention to climate change around the world. *Current Anthropology*, 55(3), 249–275.
- Roberts, L. (2021a, August 30). New United Nations report on climate change documents the grave condition of the world's glaciers. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/08/30/new-united-nations-report-on-climate-change-documents-the-grave-condition-of-the-worlds-glaciers/>.
- Roberts, L. (2021b, September 16). Russian geopolitical strategies in the Arctic are complicated by rapid glacier retreat on remote islands. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/09/16/russian-geopolitical-strategies-in-the-arctic-are-complicated-by-rapid-glacier-retreat-on-remote-islands/>
- Starovoitov, S. (2021, September 24). Glacier funerals offer a way of coping with ecological grief. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/09/24/glacier-funerals-offer-a-way-of-coping-with-ecological-grief/>
- Walther, K. (2021, November 12). Leaders from glaciated regions highlight importance of women, youth and indigenous peoples at COP26. *State of the Planet [GlacierHub]*. <https://news.climate.columbia.edu/2021/11/12/leaders-from-glaciated-regions-highlight-importance-of-women-youth-and-indigenous-peoples-at-cop26/>

