



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto Nacional de
Investigación en Glaciares y
Ecosistemas de Montaña - INAIGEM



ISSN 2519-7649

REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Año 3, N° 4
Junio 2018
Huaraz - Ancash



10 años
MINAM

Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Año 3, Número 4 – Junio 2018



INAIGEM

Instituto Nacional de Investigación en
Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Huaraz, Ancash, Perú



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto Nacional de
Investigación en Glaciares y
Ecosistemas de Montaña - INAIGEM

Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

INAIGEM

Año 3, Número 4 - Junio 2018

Presidente Ejecutiva

Dra. Gisella Orjeda

Gerente General

Abg. Marita Mercado Zavaleta

Editor

Mg. Steven A. Wegner

Comité Editorial

Abg. Marita Mercado Zavaleta

Ing. Ricardo Villanueva Ramírez

Abg. Roberto Arias Flores

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

Dr. Bryan G. Mark (Department of Geography, The Ohio State University, Columbus, EE.UU.)

La **Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña** es una publicación científica de periodicidad semestral (junio y diciembre). Tiene como objetivo difundir los resultados de trabajos de investigación en glaciares y ecosistemas de montaña desarrollados en los Andes, especialmente en el Perú, pero también en otros países andinos. La revista está dirigida a investigadores en temas de glaciología y ecología de ecosistemas de montaña, así como en disciplinas afines de ciencias de la tierra, ciencias biológicas y ciencias sociales, y además a tomadores de decisiones, docentes y estudiantes universitarios, y público interesado en general.

La **Revista** publica artículos científicos originales e inéditos, especialmente en las áreas de glaciología y ecología de ecosistemas de montaña, y además en disciplinas afines de ciencias de la tierra, ciencias biológicas y ciencias sociales. Los trabajos recibidos son sometidos a una evaluación doble ciego por revisores pares externos al INAIGEM, según criterios de calidad profesional.

La **Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña** no está indizada todavía, pero nuestra meta es cumplir con las pautas para serlo, cuyo trámite se iniciará después de la publicación del quinto número.

ISSN 2519-7649

Editado por:

Copyright © 2018. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Jr. Juan Bautista Mejía 887

Huaraz, Ancash, Perú

Teléfono: (51) 043-22-1766 / 043-45-6234

Correo electrónico: publicaciones@inaigem.gob.pe

El contenido de cada artículo es de responsabilidad exclusiva de los autores y no expresa, necesariamente, la opinión de la **Revista** o del INAIGEM.

Es permitido realizar la reproducción parcial o total de los artículos publicados en esta revista con la obligación de indicar el nombre del autor y la fuente.

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-17526

Diagramación: Soluciones Gráficas

Impreso en:

Gráfica Publi Industria E.I.R.L.

Av. Alameda Los Pinos Mz. Ñ1 Lt. 5 - Chorrillos

Octubre de 2018

Tiraje: 500 ejemplares

La **Revista** está disponible a texto completo en:

<http://www.inaigem.gob.pe/biblioteca/publicaciones/compilado>

Fotos de la portada: (arriba) Nevado Chopiraju o Andavite, Quebrada Quillcayhuanca, Huaraz, Ancash (R. Villanueva); (derecha) Laguna Patococha, Carpa, Recuay, Ancash (D. Ocaña); (abajo) Taya o taulli macho (*Lupinus weberbaueri*) con inflorescencia seca, Quebrada Santa Cruz, Huaylas, Ancash (G. Martel); (izquierda) Caracara andino juvenil (*Phalcoboenus megalopterus*), Quebrada Pariac, Huaraz, Ancash (H. Jara). **Foto de la contraportada:** Laguna Palcacocha desde Laguna Perolcocha, con nevados Palcaraju y Pucaranra atrás, Huaraz, Ancash (I. Sotelo).

Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

INAIGEM

Año 3, Número 4, Junio 2018

CONTENIDO

Editorial	7
1. Partículas absorbentes de luz durante El Niño y El Niño Costero en los glaciares de la Cordillera Blanca, Perú <i>Light-absorbing particles during El Niño and El Niño Costero in the glaciers of the Cordillera Blanca, Peru</i> Wilmer Sánchez Rodríguez y Carl Schmitt	9
2. Estimación del área de la superficie y el cambio de volumen del glaciar del nevado Champará (Cordillera Blanca, Perú) a partir de las imágenes y los modelos de elevación digital del sensor ASTER / Terra (2000-2010) <i>Estimation of the surface area and change in volume of the glacier of Mount Champará (Cordillera Blanca, Peru) based on digital images and elevation models of the ASTER sensor / Terra (2000-2010)</i> Joel Rojas Acuña y Juvenal Tordocillo Puchuc	23
3. Impacto del cambio climático en el nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Perú) y en el recurso hídrico <i>Impact of climate change on Mount Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Peru) and on water resources</i> Walter Silverio	43
4. Implementación de dos sistemas de biorremediación como estrategia para la prevención y mitigación de los efectos del drenaje ácido de roca en la Cordillera Blanca, Perú <i>Implementation of two bioremediation systems as a strategy for the prevention and mitigation of the effects of acid rock drainage in the Cordillera Blanca, Peru</i> Anaïs Zimmer, Mariza K. Brito Rodríguez, Christiam J. Alegre Oropeza, Jhon W. Sánchez León y Jorge Recharte Bullard.....	57
5. Recuperación de servicios ecosistémicos de áreas afectadas por el aluvión de 2012 en la microcuenca Santa Cruz, Huaylas, Ancash <i>Recovery of ecosystemic services in areas affected by the flood of 2012 in the Santa Cruz microbasin, Huaylas, Ancash</i> Ana Marlene Rosario Guerrero.....	77
6. Pasantías formativas del Instituto de Montaña: Generación de información y capacidades <i>Formative internships of the Mountain Institute: Generation of information and skills</i> Isabel Menéndez y Jorge Recharte Bullard.....	97
Guía para Autores	104

EDITORIAL

Investigaciones en el Nevado Coropuna

El nevado o volcán Coropuna en la Cordillera Ampato (provincias de Castilla, y Condesuyos del departamento de Arequipa) es un gran estratovolcán activo que consiste en un complejo con domos, seis conos y tres coladas de lava, y tiene seis cumbres entre aproximadamente 6000 y 6400 msnm. Con una altura máxima de 6377 (Instituto Geofísico del Perú) o 6426 (Instituto Geográfico Nacional), es el volcán más alto del Perú, y su cumbre máxima está superada solamente por el nevado Yerupajá (6634 msnm) en la Cordillera Huayhuash y los dos picos del nevado Huascarán -Norte de 6655 msnm y Sur de 6757 msnm (INAIGEM, 2017)- en la Cordillera Blanca. Además, el volcán se extiende sobre un área de 20 km de longitud por 12 km de ancho. En tiempos prehispánicos, el Coropuna era un nevado reverenciado y volvió a ser un foco de interés a principios del siglo XX.

Como parte de la búsqueda mundial de los picos más altos como metas de escalada, el Coropuna atrajo el interés de montañistas internacionales en 1911 cuando los norteamericanos Annie Smith Peck y Hiram Bingham coincidieron en escoger el gran volcán para sus expediciones individuales. Resultó que Peck llegó primero, acercándose desde el pueblo de Viraco al lado sureste (Peck, 1912, 1912-13). Su equipo de siete personas incluyó cinco peruanos, pero ningún guía profesional como los que ella empleó en su exitosa conquista del pico norte del Huascarán en 1908. Aquí, llegó a la parte alta del macizo el 16 de julio y escaló dos picos por el lado este (6035 y 6234 msnm), notando que la elevación era menor al Huascarán. Mientras tanto, Bingham había decidido primero explorar algunas ruinas en el valle de Urubamba, donde reubicó el famoso sitio de Machu Picchu el 24 de julio, antes de hacer su intento de escalar el Coropuna en octubre. Acercándose desde Chuquibamba al suroeste de Viraco, subió a la nieve sin mucha dificultad el 15 de octubre y escaló el pico oeste que resultó ser el más alto con una altura de 21,703 pies (6615 msnm), según su topógrafo (Bingham, 1912, 1922:49).

Acompañando a la expedición de Bingham estuvo el prominente geógrafo americano Isaiah Bowman, quien participó en tres expediciones a Sudamérica (1907, 1911 y 1913) y escribió dos libros sobre los resultados: *South America* (1915) y *The Andes of Southern Peru* (1916). El último libro incluye algunos detalles sobre la línea de nieve del Coropuna y la compara con observaciones hechas en los Andes de Chile y Bolivia (1916:274-285). Décadas después, en 1974 y 1976, los suizos Max Weibel y Fejer Zsolt (1977) realizaron investigaciones geológicas que caracterizaron al volcán con métodos petrológicos, geoquímicos y geocronológicos.

Desde comienzos del siglo XXI, se inician nuevas y diversas investigaciones en el Coropuna dentro de los campos de geología, vulcanología, glaciología, climatología, arqueología y otras ciencias. En setiembre 2003, un equipo dirigido por Lonnie Thompson hizo tres perforaciones para sustraer núcleos de hielo, dos al borde del cráter central con 34 m de longitud y una directamente sobre el cráter con 146.3 m. Los análisis reportados por Buffen (2008) evidencian variabilidad climática, incluyendo varias sequías severas, en el Holoceno y el último período glacial del Pleistoceno, remontando 16,000 años, pero la historia del núcleo más largo todavía queda por esclarecer.

Varios investigadores han realizado estudios glaciológicos en el Coropuna, incluyendo modelamiento digital (Racoviteanu et al., 2007) y medición de la cobertura glacial usando técnicas de teledetección y GIS (p. ej., modelos de elevación digital), combinadas con GPR (“ground penetrating radar” o georradar) (Pедуzzi, Herold y Silverio, 2010). Midiendo el área glacial y la profundidad del hielo, se puede estimar el volumen de hielo y, determinando la densidad, estimar el volumen equivalente de agua (véase Silverio en este número), aunque la variabilidad en la profundidad de hielo presenta un gran reto para alcanzar una alta precisión. Estudios complementarios han tratado las condiciones meteorológicas alrededor del Coropuna y efectos del ENSO (véase Silverio) y el cambio climático (Úbeda, 2011). Otros han investigado las altitudes de la línea de nieve persistente, los ELA (“equilibrium line altitude” entre zonas de acumulación y ablación) y la presencia de permafrost. Una conclusión que todos los análisis de cobertura glacial han

mostrado es la progresiva reducción en el área de hielo, lo que impacta en consideraciones de disponibilidad de agua proveniente de estas masas glaciares para los usos de la población circundante.

Entre otras disciplinas, unos estudios biológicos han investigado la presencia de diatomeas de agua dulce en el nevado (Weide et al., 2017) y la flora moderna de la puna que rodea al nevado basada en estudios de polen (Keuntz et al., 2007), lo que tiene potencial utilidad para las reconstrucciones paleoclimáticas. Tomando en cuenta la información recogida en el siglo XVI por cronistas como Pedro Cieza de León, los arqueólogos han dirigido estudios a varios sitios alrededor del Coropuna para investigar su posible relación con un famoso templo de la época del Tahuantinsuyo (Reinhard, 1999). Un reciente proyecto arqueológico “Apu Coropuna” planea trabajar en los sitios arqueológicos Antinpampa, Choquemarca (3100 msnm) y Maucallacta-Pampacolca (3750 msnm). Los yacimientos se emplazan en el valle alto de Majes, frente al nevado Coropuna y presentan una ocupación extensa que va desde el Horizonte Temprano (1200-200 a. C.) hasta el Horizonte Tardío (1470-1532 d. C.).

En 2001, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) del Perú publicó un estudio de la amenaza volcánica potencial del Coropuna (Núñez y Valenzuela, 2001). Desde julio de 2018, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) monitorea al volcán Coropuna en tiempo real con estaciones geofísicas y emite informes quincenales sobre la actividad sísmica porque lo considera como uno de los macizos de riesgo muy alto (<https://ovs.igp.gob.pe/monitoreo>). Por otra parte, entre 2015 y 2018, el programa de investigación CRYOPERU ha desarrollado el proyecto “Análisis de las altitudes de la línea de equilibrio (ELA) presentes y pasadas, para evaluar el impacto del cambio climático y la evolución durante las próximas décadas de los glaciares de la vertiente del Pacífico de los Andes de Perú”, que incluye al Coropuna.

Como uno de sus recientes enfoques de investigación, el INAIGEM realizó un reconocimiento inicial del macizo del Coropuna en junio de este año, considerando dos aspectos fundamentales: el retroceso glaciar del nevado Coropuna y la condición de los ecosistemas en el área circundante al nevado. Además, se recolectaron muestras de nieve para análisis de carbono negro. Todo indica que estamos en una muy intensa y fructífera etapa de la investigación de este gran volcán nevado.

El Editor

- Bingham**, H. (1912). The ascent of Coropuna. *Harper's Monthly Magazine*, (marzo), 489-502; (1922). *Inca land: Explorations in the highlands of Peru*. Boston y Nueva York, Houghton Mifflin Company.
- Bowman**, I. (1916). *The Andes of southern Peru: Geographical reconnaissance along the seventy-third meridian*. Nueva York, Henry Holt and Company (para The American Geographical Society of New York).
- Buffen**, A. M. (2008). *Abrupt Holocene climate change: Evidence from a new suite of ice cores from Nevado Coropuna, southwestern Peru and recently exposed vegetation from the Quelccaya Ice Cap, southeastern Peru*. Tesis de maestría. Columbus, The Ohio State University.
- INAIGEM**. (2017). *Expedición científica Huascarán INAIGEM 2017*. Nota Técnica 1. Huaraz, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).
- Keuntz**, A., Galán de Mera, A., Ledru, M.-P. y Thouret, J.-C. (2007). Phytogeographical data and modern pollen rain of the puna belt in southern Peru (Nevado Coropuna, Western Cordillera). *Journal of Biogeography*, 34(10), 1762-1776.
- Núñez Juárez**, S. A. y Valenzuela Ortiz, G. I. (2001). Estudios de riesgos volcánicos en el sur del Perú: Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán-nevado Coropuna. *Boletín*, C 25. Lima, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Peck**, A. S. (1912). Miss Annie Peck's Latest Ascent [Note in "Geographical Record"]. *Bulletin of the American Geographical Society*, 44(3), 207; (1912-13). A race for a mountain top! The first ascent of stately Coropuna. *The Illustrated Outdoor World and Recreation*, 48(1 - December 1912), 19-21 y 56-59; y 48(2 - January 1913), 88-90 y 113.
- Peduzzi**, P., Herold, C. y Silverio, W. (2010). Assessing high altitude thickness, volume and area changes using field, GIS and remote sensing techniques: The case of Nevado Coropuna (Peru). *The Cryosphere*, 4, 313-323.
- Racoviteanu**, A. E., Manley, W. F., Arnaud, Y. y Williams, M. W. (2007) Evaluating digital elevation models for glaciologic application: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 110-125.
- Reinhard**, J. (1999). Coropuna: Lost mountain temple of the Incas. *South American Explorer*, 58, 5 y 26-30.
- Úbeda**, J. (2011). *El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (Cordillera Occidental de los Andes Centrales)*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Weibel**, M. y Zsolt, F. (1977). El nevado Coropuna, Departamento de Arequipa. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 57-58, 87-98.
- Weide**, D. M., Fritz, S. C., Brinson, B. E., Thompson, L. G. y Billups, W. E. (2017). Freshwater diatoms in the Sajama, Quelccaya, and Coropuna glaciers of the South American Andes. *Diatom Research*, 32(2), 153-162.

Partículas Absorbentes de Luz durante El Niño y El Niño Costero en los Glaciares de la Cordillera Blanca, Perú

Light-absorbing Particles during El Niño and El Niño Costero in the Glaciers of the Cordillera Blanca, Peru

Wilmer Sánchez Rodríguez¹ y Carl Schmitt²

¹Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Huaraz, Ancash

²National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, EE.UU.

Resumen

Este estudio proporciona de manera general el impacto de las Partículas Absorbentes de Luz (LAPs, por sus siglas en inglés) en la nieve superficial de los glaciares de la Cordillera Blanca, dando prioridad al carbono negro (CN), ya que representa el material particulado $PM_{2.5}$ más común de los contaminantes atmosféricos proveniente de la quema de pastos, la quema de residuos agrícolas, el uso de biomasa para cocinar, el parque automotor y toda actividad humana que involucre la combustión de combustibles fósiles. La presencia de la LAPs sobre los glaciares explicaría en parte el acelerado retroceso de los glaciares, debido a que involucra el aumento de la tasa de fusión. Aquí informamos sobre las concentraciones de LAPs en la nieve superficial de los glaciares Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju y Vallunaraju durante la ocurrencia de El Niño y El Niño Costero. Entre 2016 y 2017 se recolectaron muestras de nieve de forma mensual en los glaciares a una altitud aproximada de 5000 msnm. Estas muestras fueron fundidas y filtradas en el campo y luego se analizaron bajo el método de calentamiento por absorción de luz (LAHM, por sus siglas en inglés) para determinar las concentraciones de carbono negro efectivo (CNe). Este método se basa en la medición de la capacidad de las partículas retenidas en los filtros para absorber la luz visible, siendo el carbono negro un tipo de LAP con un alto poder para absorber la luz solar a diferencia del polvo mineral. Los resultados de LAHM se utilizaron para estimar la disminución del albedo mediante el programa de simulación SNICAR. Asimismo, se utilizaron datos de radiación solar registrados en las cercanías de los glaciares, con el fin de estimar la cantidad de nieve fundida a causa del carbono negro en kg/m^2 o su equivalente en mm de agua (mm w.e.). Los resultados muestran una mayor concentración de carbono negro durante El Niño (1047.07 y 1091.75 ng/g) que durante El Niño Costero (780.67 y 706.40 ng/g), fundiéndose un total de 3897.56 kg/m^2 de nieve durante El Niño y 1884.03 kg/m^2 durante El

Niño Costero. En cuanto a la reflectancia de la nieve estimamos una reducción del 15% en promedio durante el período de estudio.

Palabras clave: Glaciares, nieve, carbono negro, El Niño, El Niño Costero, Cordillera Blanca

Abstract

This study provides a general assessment of the impact of Light Absorbing Particles (LAPs) on the surface snow of the Cordillera Blanca glaciers, giving priority to black carbon (BC), since it represents the most common particulate material $PM_{2.5}$ of the atmospheric pollutants coming from the burning of pastures, the burning of agricultural residues, the use of biomass for cooking, the automotive fleet and all human activity that involves the combustion of fossil fuels. The presence of LAPs on the glaciers would partly explain the accelerated retreat of the glaciers, because it involves an increase of the fusion rate. Here we report the concentrations of LAPs in the superficial snow of the glaciers Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju and Vallunaraju during the occurrence of the El Niño and El Niño Costero events. Between 2016 and 2017, snow samples were collected monthly in the glaciers at an altitude of approximately 5000 masl. These samples were melted and filtered in the field and then analyzed by the method of heating by light absorption (LAHM in English) to determine the concentrations of effective black carbon (BCe). This method is based on measuring the ability of the particles retained in the filters to absorb visible light, with black carbon being a type of LAP with high power to absorb sunlight, unlike mineral dust. The results of LAHM were used to estimate the albedo decrease through the SNICAR simulation program. Likewise, solar radiation data recorded in the vicinity of the glaciers was used to estimate the amount of snow melted due to black carbon in kg/m^2 or its equivalent in mm of water (mm w.e.). The results show a higher concentration of black carbon during

El Niño (1047.07 and 1091.75 ng/g) than during El Niño Costero (780.67 and 706.40 ng/g), melting a total of 3897.56 kg/m² of snow during El Niño and 1884.03 kg/m² during El Niño Costero. Regarding the reflectance of the snow, we estimate a reduction of 15% on average during the study period.

Keywords: *Glaciers, snow, black carbon, El Niño, Coastal El Niño, Cordillera Blanca*

Introducción

Las partículas absorbentes de luz (LAPs, por sus siglas en inglés) se emiten en forma natural durante la quema de todo tipo de vegetación y las erupciones volcánicas. De manera antrópica, las LAPs son emitidas a través de la combustión incompleta de los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo, los biocombustibles y otros. Algunas fuentes importantes son los automóviles, las fábricas, la quema de residuos agrícolas, la quema de pastos y los incendios forestales provocados por el hombre según sus costumbres ancestrales (Walter, 2017). Estas partículas tienen una vida corta en la atmósfera, sin embargo en este corto período pueden llegar a transportarse hasta los glaciares, donde se precipitan en forma húmeda dentro de gotas de agua o copos de nieve y por precipitación seca.

Las causas del retroceso glaciar son variadas, siendo el aumento de temperatura atmosférica y la mayor frecuencia del evento ENOS (El Niño Oscilación del Sur) los principales responsables del acelerado retroceso de los glaciares en los Andes Tropicales en las últimas cuatro décadas a partir de 1976 (Rabatel et al., 2013). El factor antrópico contribuye con las emisiones de LAPs, las mismas que se depositan sobre los glaciares y ejercen un forzamiento radiativo positivo al incrementar la cantidad de energía absorbida y, por ende, a una mayor tasa de fusión de los glaciares. Un tipo de LAP es el denominado carbono negro (CN) que conduce al calentamiento, es así como Warren y Wiscombe (1980) describen que la presencia de carbono negro en la nieve disminuye el albedo y aumenta la absorción de radiación solar, estimando una disminución del albedo entre el 5-15% para el Ártico y Antártico. Con este antecedente, se plantea como objetivos determinar el carbono negro efectivo (CNe) mediante la metodología LAHM, estimar el cambio en el albedo de la nieve superficial mediante la simulación SNICAR, determinar la cantidad de radiación solar

de onda corta en base a estaciones meteorológicas, y estimar la cantidad de nieve superficial fundida por el CNe en los glaciares Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju y Vallunaraju durante los eventos El Niño y El Niño Costero del 2016 y 2017.

El carbono negro es un componente significativo de la contaminación atmosférica por partículas finas (PM_{2.5}), su papel sobre los glaciares se relaciona con el oscurecimiento de la nieve superficial lo que induce a la absorción de luz solar en todas las longitudes de onda. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático considera al carbono negro como el segundo mayor contribuyente al calentamiento global después del dióxido de carbono (IPCC, 2007). Esto es significativo si se considera que la mayor parte de la criósfera actúa como una superficie reflectante, su oscurecimiento llevaría al calentamiento del planeta. En la Cordillera Blanca, la acumulación de nieve suministra agua durante la estación de estiaje a medida que se derrite, esta tasa de derretimiento es afectada por la presencia de carbono negro y la mayor radiación solar recibida en la zona ecuatorial, como lo describen Bond et al. (2013) en referencia a latitudes medias.

Antecedentes

Sobre la base de muestras obtenidas en 15 glaciares de la Cordillera Blanca durante la estación de estiaje (julio-agosto) del 2011, 2012 y 2013, Schmitt et al. (2015) hallaron una concentración mínima de 2.0 ng/g y un máximo de 80.0 ng/g. Esta variación se debe a la ubicación de los glaciares muestreados respecto a Huaraz y la variabilidad altitudinal de las zonas de muestreo.

Un estudio indica que las concentraciones de carbono negro aumentaron significativamente desde mediados de la década de 1990 en la región del Everest durante los monzones (Ming et al., 2008). Además, el proyecto Atmospheric Brown Cloud (Ramanathan y Carmichael, 2008) muestra que el derretimiento de los glaciares del Himalaya se aceleró debido al calentamiento producido por el carbono negro presente en el aire, en promedio 0.12 K por década. Asimismo, diversos modelos (Flanner et al., 2009; Menon et al., 2010; Qian et al., 2011) proyectan que el oscurecimiento de los glaciares por la precipitación de carbono negro es un factor crucial para la fusión acelerada de la nieve.

En el estado de Washington, EE.UU., se monitorearon las concentraciones de carbono negro en la nieve durante los inviernos de 2012 y 2013. Los resultados muestran un aumento a finales de invierno-primavera y, además, se determinó que durante un incendio forestal adyacente al sitio de estudio las concentraciones de carbono negro fueron mucho más altas que en años anteriores (Delaney Kaspari y Jenkins, 2015). A nivel global, se estimó una concentración de carbono negro por debajo de 10 ng/g en el Ártico (Doherty et al., 2010), para Noruega y Rusia entre 21 ng/g y 30-40 ng/g respectivamente, mientras que para China se estimó entre 100-900 ng/g (Wang, Doherty y Huang, 2013), basándose en muestreos estacionales.

Influencia de El Niño y El Niño Costero

Está generalmente aceptado que el evento El Niño conlleva alteraciones en el clima a nivel global. Los glaciares no son ajenos a sufrir los cambios provocados en la temperatura, precipitación, flujo de vientos y otros debido al calentamiento de la superficie del mar frente a la costa peruana (Niño 1+2) y la zona central del océano Pacífico (Niño 3+4). Es así que se evaluó el aumento en la temperatura del mar usando imágenes satelitales (véase Figuras 5 y 6) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) durante el período de estudio y se relacionó con diversas anomalías que aceleran el retroceso glaciar, es así, por ejemplo, que la línea de equilibrio (ELA, por sus siglas en inglés) se eleva en altitud, ya que se registran menores precipitaciones en los meses previos a la temporada húmeda, lo cual conlleva a la inexistencia de un manto de nieve sobre los glaciares (Figura 1), lo que intensifica el proceso de ablación. Así lo demuestran Thompson et al. (2006) basándose en testigos de hielo extraídos entre 1983 y 2006 en glaciares de Perú y Ecuador. Asimismo, durante El Niño, la temperatura atmosférica se incrementa (entre 1 a 3 °C) favoreciendo la ocurrencia de precipitaciones líquidas en altitudes entre 5100 y 5300 msnm, lo que origina una disminución en el albedo debido a la ausencia de nieve (Favier, Wagnon y Ribstein, 2004; Favier et al., 2004).

Debido al incremento de la temperatura del aire durante El Niño existe una alta probabilidad de que se produzcan incendios forestales, como se constató durante la estación seca de 2016 (Figura 2). Estos eventos están relacionados a costumbres ancestrales

de generar la quema de pastos en las zonas altas próximas a los glaciares con el fin de producir lluvias, esto conlleva a la producción de diferentes tipos de LAPs, entre las cuales destaca el carbono orgánico con el 70% en masa, el cual, aunque tiene una menor capacidad de absorción de luz, incide en la disminución del albedo de los glaciares al ser un agente contaminante (USEPA, 2012). Otra particularidad vista durante El Niño de 2015/2016 fue la presencia de algas rojas en el glaciar Yanapaccha (Figura 3), cubriendo gran parte de la zona de ablación. Estas algas implican una reducción en el albedo ya que absorben la luz de las longitudes de onda ultravioleta y visible, como se determinó en el estudio de Yallop et al. (2012).



Figura 1. Escasa cobertura de nieve sobre el glaciar Yanapaccha en octubre de 2016. Foto: W. Sánchez.



Figura 2. Humo sobre Huaraz procedente de la quema de pastos en la Cordillera Negra en noviembre de 2016. Foto: W. Sánchez.

A inicios de 2017, se incrementó abruptamente la temperatura superficial del mar en la región denominada Niño 1+2, mientras que en la región Niño 3.4 ocurría la transición de condiciones La Niña a condiciones neutras (SENAMHI, 2017). Este calentamiento sobre El Niño 1+2 (Figura 6) propició la ocurrencia de precipitaciones intensas en

el flanco occidental de la Cordillera Blanca (Figura 4), principalmente entre febrero y marzo. A diferencia de El Niño 2015/2016, el denominado Niño Costero favoreció la precipitación sólida durante gran parte de la estación húmeda de 2017, lo cual disminuyó las concentraciones de LAPs y a su vez incrementó el albedo de los glaciares.



Figura 3. Presencia de algas rojas sobre el glaciar Yanapaccha en febrero de 2016. Foto: W. Sánchez.



Figura 4. Presencia de nieve sobre la morrena del glaciar Vallunaraju en marzo de 2017. Foto: W. Sánchez.

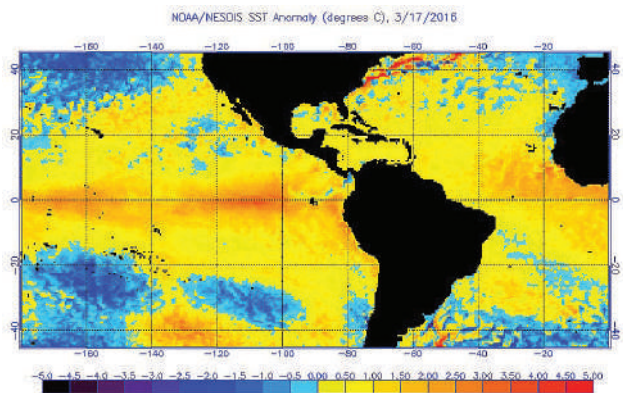


Figura 5. Anomalía de la temperatura de la superficie del mar durante El Niño del 2016. Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

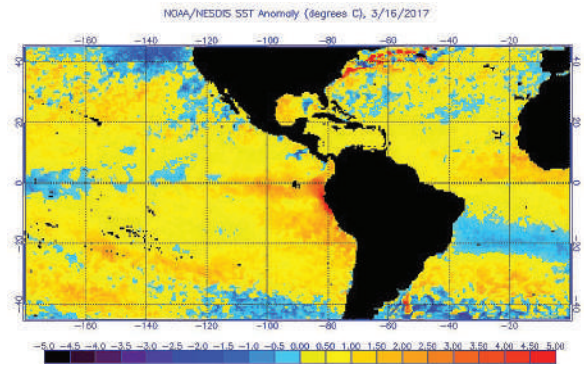


Figura 6. Anomalía de la temperatura de la superficie del mar durante El Niño Costero del 2017. Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Área de Estudio

El estudio se enmarca en la vertiente occidental de la Cordillera Blanca, específicamente en los glaciares Yanapaccha (S 09°01'36", W 77°34'35") en la quebrada Llanganuco, Shallah (S 09°28'18", W 77°19'36") en la quebrada Shallah, Tocllaraju (S 09°20'53", W 77°23'50") en la quebrada Ishinca y Vallunaraju (S 09°25'15", W 77°27'24") en la quebrada Llaca. Políticamente, los glaciares Vallunaraju y Tocllaraju se localizan en la provincia de Huaraz, distrito de Taricá, el glaciar Shallah en la provincia de Huaraz, distrito de Huaraz y el glaciar Yanapaccha en la provincia de Yungay, distrito de Yungay. Los glaciares muestreados se indican en la Figura 7.

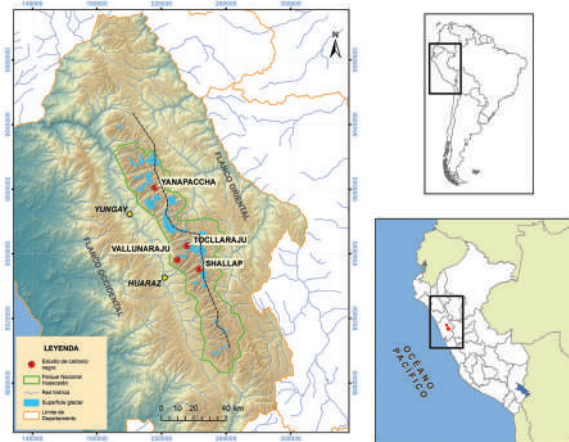


Figura 7. Mapa de ubicación de los glaciares muestreados en el flanco occidental de la Cordillera Blanca. Fuente: Elaboración propia.

La selección de estos glaciares se realizó tomando como referencia a la ciudad de Huaraz, debido a que es la principal fuente de contaminantes atmosféricos, considerando la hipótesis de que los glaciares más

cercanos a Huaraz presentan mayor concentración de carbono negro en comparación a los glaciares más alejados.

Datos

Se trabajó con datos de radiación solar directa registrados en las estaciones meteorológicas ubicadas en Tinguá (S 09°13'20.82", W 77°41'18", 2522 msnm) y Quillcayhuanca (S 09°29'53", 77°24'59", 3688 msnm), pertenecientes al Centro de Investigación Ambiental para el Desarrollo de la UNASAM, correspondientes al período 2016–2017. Se optó por trabajar con estos datos distribuidos de forma gratuita (<http://www.ciiaders.com/>), también por su cercanía a los glaciares en estudio. Debido a la falta de datos para enero y parte de febrero de 2016, se usó datos de radiación solar registrados en estaciones meteorológicas ubicadas en las morrenas de los glaciares Shallap (S 9°29'27", W 77°20'43", 4715 msnm) y Artesonraju (S 8°58'12", W 77°38'14", 4815 msnm). Este conjunto de datos se designó como la radiación solar de onda corta que llega sobre los glaciares Yanapaccha, Tocllaraju, Shallap y Vallunaraju. Todas las estaciones meteorológicas mencionadas son de la marca Campbell Scientific del modelo CR1000, equipado con un piranómetro de termopila digital modelo CS320 que mide la radiación de onda corta, y cuya operación y calibración está sujeta a estándares de la empresa. En cuanto a los datos, estos fueron procesados por personal técnico calificado.

Las estaciones meteorológicas fueron programadas para registrar la radiación solar de onda corta (W/m^2) cada media hora. El procesamiento de estos datos consistió en completar datos faltantes entre las 7 y las 18 horas para obtener una sumatoria horaria de la radiación solar durante cada mes dentro del período de estudio, lo que representa la energía solar que llega a los glaciares por hora.

Trabajo de Campo

Durante el 2016, se realizaron expediciones mensuales a los glaciares Yanapaccha y Shallap; a partir de 2017, se sumaron los glaciares Vallunaraju y Tocllaraju, ejecutándose expediciones de manera intercalada, es decir que en un mes se visitaron los glaciares lejanos a Huaraz, y el siguiente los glaciares cercanos. De agosto en adelante se visitó un glaciar lejano y un glaciar cercano por mes. El objetivo de

cada expedición fue recolectar una muestra de nieve reciente, la misma que represente la capa de nieve sobre el glaciar. Para ello, se designó un área ideal, es decir un lugar relativamente plano donde se acumule la nieve de forma uniforme, evitando áreas de posibles avalanchas, rutas de escaladores y cercanía a las morrenas. Las coordenadas de los puntos de muestreo fueron de S 9°01'44", W 77°34'55", 5005 msnm para el glaciar Yanapaccha, S 9°21'09", W 77°24'43", 5184 msnm para el glaciar Tocllaraju, S 9°26'06", W 77°27'44", 5160 msnm para el glaciar Vallunaraju y de S 9°29'30", W 77°19'50", 5010 msnm para el glaciar Shallap. En lo posible, se trató de respetar estas coordenadas en cada mes de muestreo.

En cada glaciar se recolectaba 2 kg de nieve superficial dentro de un cuadrante de 50 x 50 cm, a un espesor de dos cm aproximadamente (Figura 8). Para ello, se utilizaba guantes de látex con el fin de evitar contaminar las muestras. La nieve se llenaba dentro de bolsas de plástico con cierre hermético que se sellaba inmediatamente una vez completada la muestra. Luego se fundía la nieve, para lo cual se colocaba la nieve contenida en la bolsa plástica en un recipiente con agua, el cual se calentaba a fuego controlado mediante una cocinilla de gas butano (Figura 9). Cuando ya estaba fundida la nieve, se procedía al filtrado, que consistía en succionar la muestra líquida contenida en la bolsa plástica usando una jeringa de 60 ml de capacidad, para luego ser conectada a un empaque de plástico tipo colador que contenía un filtro de cuarzo de 0.7 micras de porosidad. Mediante un empuje continuo de la jeringa se obligaba el paso del agua por el filtro (Figura 10), quedando retenidas las LAPs en el filtro (Figura 11). Se filtró un total de 600 ml de muestra líquida a partir de cada muestra de nieve.



Figura 8. Recolectación de una muestra de nieve superficial en el glaciar Yanapaccha. Foto: W. Sánchez.



Figura 9. Proceso de fusión de una muestra de nieve.
Foto: W. Sánchez.



Figura 10. Proceso de filtrado de muestra líquida.
Foto: W. Sánchez.



Figura 11. Filtros con distintas coloraciones debido a la presencia de diferentes LAPs. Foto: W. Sánchez.

Metodología

Análisis de los Filtros bajo el Método LAHM

El análisis de los filtros se realizó mediante el método LAHM (Light Absorption Heating Method) desarrollado por Schmitt et al. (2015), el cual cuantifica la absorción de luz en el rango visible por las LAPs. Para ello, se mide el aumento de temperatura de una carga de partículas en un filtro cuando se aplica la luz visible (Figura 12). Las LAPs en el filtro absorben la luz haciendo que el filtro se caliente, un termómetro digital registra la temperatura

del filtro cada segundo, después de un período inicial de 10 segundos se establece una temperatura base. La fuente de luz (lámpara led de 7 W) se enciende durante 30 segundos, entonces se apaga, la temperatura del filtro se registra en 5 mediciones adicionales. Los aumentos de temperatura se normalizan por la temperatura media registrada durante los primeros 10 segundos y, sobre la base de masas conocidas de carbono negro, se determina la masa desconocida de un filtro. Esta técnica de análisis mide en conjunto todas las partículas absorbentes de luz (Khan et al., 2017), sin llegar a diferenciar los diferentes tipos de LAPs presentes en el filtro, para lo cual sería necesario un análisis físico-químico. Por esta razón, se utiliza el término carbono negro efectivo (CNe), que es la cantidad de carbono negro necesario para absorber una determinada porción de energía solar, lo que representa la concentración de carbono negro del total de partículas presentes en el filtro. El instrumento de análisis aquí utilizado reemplaza a la versión anterior usada por Schmitt y otros en el 2015. Actualmente, está en redacción un documento que describe al detalle las características de los componentes físicos inmersos en el aparato, así como la sustentación en el cambio de la frecuencia de mediciones. Una ventaja de la metodología LAHM frente a otros métodos de análisis (como es el caso del SP2) es la medida directa del calentamiento que generan las LAPs en el filtro, considerando una sección transversal de absorción de masa (MAC) conocida (carbono fullereno), lo que conduce a una menor incertidumbre.

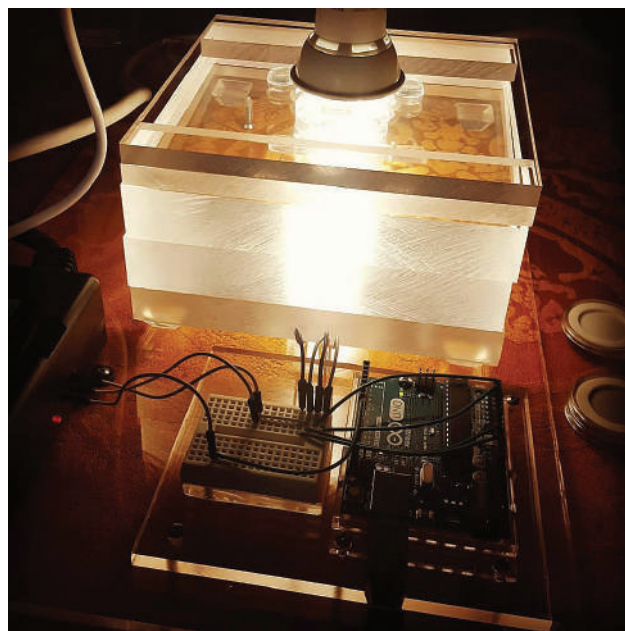


Figura 12. Análisis de los filtros bajo el método LAHM.
Foto: U. Nadia.

Aplicación del Programa de Simulación SNICAR

Se usó la simulación SNICAR (Snow, Ice and Aerosol Radiation) para determinar el albedo de la nieve en ausencia y presencia de carbono negro. Esta simulación permite ingresar el contenido de partículas de carbono negro efectivo (CNe). Se consideró un ángulo cenit solar de 30° , debido a que bajo este ángulo la superficie de la Tierra recibe la mayor radiación solar durante el día, en particular si ingresamos ángulos de 10° , 30° y 50° se genera un rango de incertidumbre del 10% al 25% en los resultados de albedo, no siendo considerable. Adicionalmente, se ingresaron datos como el radio efectivo del grano de nieve ($500 \mu\text{m}$), el espesor de la capa de nieve (10 m) y la densidad de nieve (300 kg/m^3). Para un mejor resultado, durante el 2017, la densidad se midió en campo durante los muestreos. La simulación fue diseñada y desarrollada por Flanner et al. (2007) con el objetivo de estimar el forzamiento radiativo del carbono negro en la nieve. Posteriormente, Flanner et al. (2009) describieron casi todas las partículas atmosféricas, incluido el carbono negro y la materia orgánica que inducen a un forzamiento radiativo positivo, y a su vez al calentamiento de la atmósfera superior sobre la capa de nieve.

Estimación de Energía Absorbida y Nieve Fundida

A partir de los datos de radiación solar de onda corta registrados en las estaciones meteorológicas, se estimó la energía total que llegó a la superficie de cada glaciar de manera mensual en W/m^2 . Cada valor de energía se multiplicó por la diferencia de albedo obtenida a partir del programa de simulación SNICAR para cada mes correspondiente al muestreo, obteniendo la energía absorbida por el carbono negro

en cada glaciar. Finalmente, para estimar la cantidad de nieve fundida a causa del carbono negro efectivo en kg/m^2 o en mm equivalente de agua (mm w.e.) de manera puntual en cada glaciar se usó el valor de la energía de calor latente de fusión (334000.00 J/kg), que es la transición entre el agua sólida a líquida. Asimismo, asumimos una densidad de 0.5 g/cm^3 con el fin de estimar la profundidad de nieve fundida en milímetros.

Resultados

Concentración de Carbono Negro

Al ser el carbono negro (CN) un tipo de LAP con un alto poder para absorber la luz visible, los resultados aquí mostrados representan la concentración de carbono negro efectivo (CNe) por gramo de nieve (ng/g). La Figura 13 muestra la variación de CNe en los glaciares Yanapaccha y Shallap de manera mensual, alcanzando valores máximos durante el final de la estación húmeda (caso del glaciar Shallap) con 1047.07 ng/g y cerca del final de la estación seca (caso del glaciar Yanapaccha) con 1091.75 ng/g . En contraste, los valores mínimos se registran en diciembre con 13.83 y 90.50 ng/g respectivamente, siendo este mes parte de la estación húmeda, mientras que los primeros cuatro meses (estación húmeda) los valores tienden a ser similares, alcanzando valores máximos en febrero con 497.55 y 425.30 ng/g respectivamente. Los valores mínimos son superiores a los hallados por Doherty et al. (2010) en el norte de Noruega y Rusia (21 y 40 ng/g), mientras que los valores máximos superan a lo hallado por Wang, Doherty y Huang (2013) en los glaciares del noreste de China (900 ng/g) muy cerca de la zona industrial.

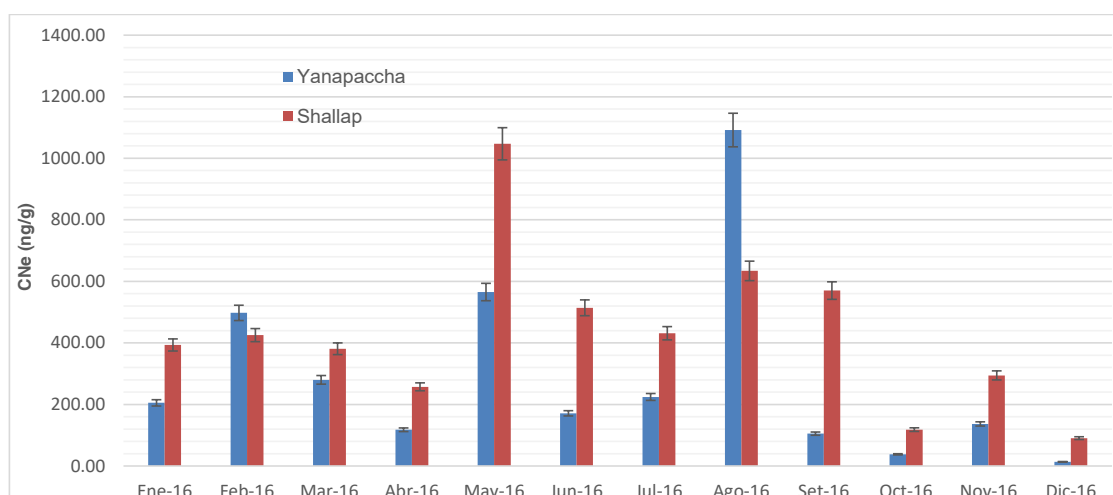


Figura 13. Concentraciones mensuales de carbono negro efectivo en los glaciares Yanapaccha y Shallap durante el 2016.

El Niño Costero favoreció la caída de precipitaciones sólidas (nevadas) sobre los glaciares, lo que permitió la formación de una espesa capa de nieve, llegando incluso a cubrir parte de las morrenas glaciares. Esto, a su vez, implicó la disminución en la concentración de CNe como se observa en la Figura 14, alcanzando un valor mínimo en el glaciar Yanapaccha (0.63 ng/g) y en el glaciar Vallunaraju (1.89 ng/g) en febrero y marzo de 2017, respectivamente. A partir del inicio de la temporada seca (mayo), las concentraciones de CNe se incrementan, alcanzando sus valores máximos entre julio y septiembre en los glaciares Vallunaraju (780.67 ng/g) y Shallap

(706.40 ng/g). Cabe resaltar que ambos glaciares se encuentran cerca de la ciudad de Huaraz, sin embargo, estos valores no llegan a superar los hallados en 2016 para el mismo período.

Cantidad de Radiación Solar

Sobre la base de los datos de radiación solar de onda corta registrados en las estaciones meteorológicas mencionadas, se determinó la energía total en W/m^2 que llega a los glaciares (Figura 15), siendo mayor durante todo el período de estudio en la estación TINGUA (2522 msnm) en comparación con la

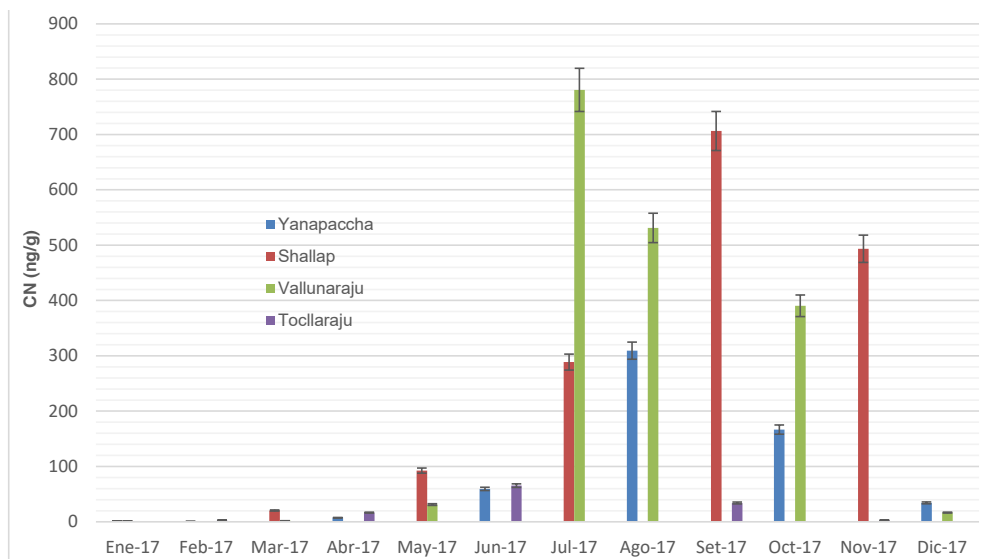


Figura 14. Concentraciones de carbono negro efectivo en los glaciares Yanapaccha, Shallap, Vallunaraju y Tocllaraju durante el 2017.

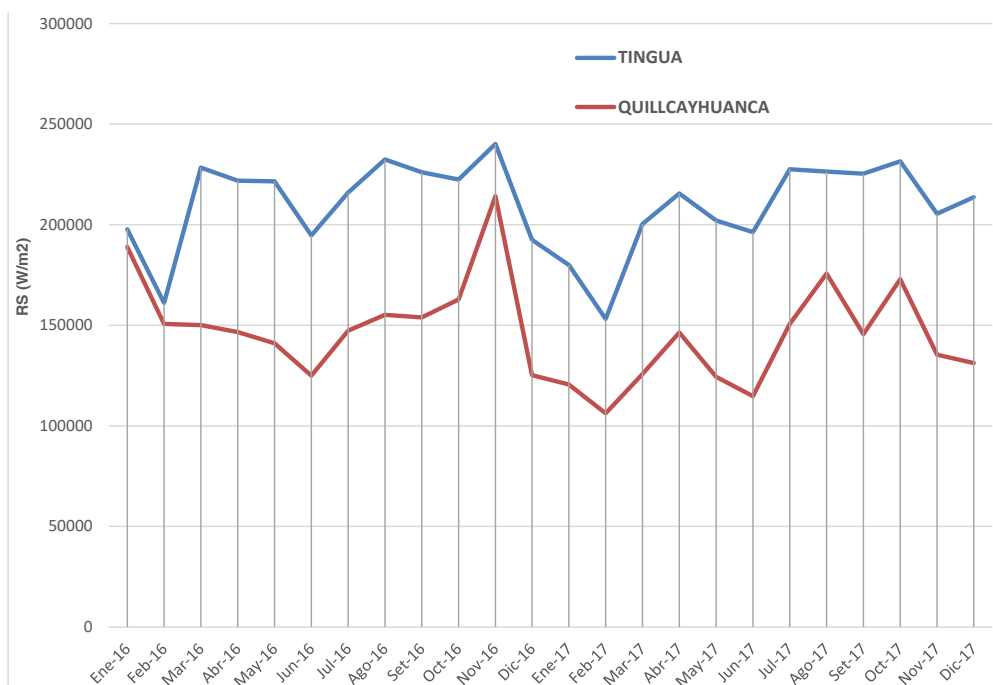


Figura 15. Variación de la radiación solar para las estaciones de TINGUA y Quillcayhuanca durante el período de estudio.

estación Quillcayhuanca (3688 msnm), registrándose picos máximos de radiación solar en noviembre de 2016 y, en contraste, se registran valores mínimos en febrero de 2017 para ambas estaciones. Un valor alto de radiación solar sumado a una alta concentración de CNe en la capa de nieve significa una mayor absorción de energía para la fusión, así lo demostraron Warren y Wiscombe (1980), basándose en pequeñas proporciones de mezcla de impurezas en la nieve que absorben la energía radiativa.

Albedo de la Nieve

El cambio de albedo causado por el CNe en la nieve superficial fue simulado mediante el programa

SNICAR. La Figura 16 muestra la variación del albedo para los glaciares Yanapaccha y Shallap durante el 2016, la línea amarilla representa el albedo (0.710) de la nieve libre de CNe. Este albedo disminuyó a medida que se ingresaron los valores de CNe, es así que los valores mínimos se registran en mayo y agosto (0.544–0.540) para los glaciares Shallap y Yanapaccha respectivamente, lo cual contrasta con los valores máximos de CNe determinados para estos meses. La tasa de derretimiento está ligada al albedo de un glaciar, este será menor cuando el glaciar presente una cobertura de nieve limpia y profunda (Flanner et al., 2007). Es así que la reducción en la concentración de CNe durante El Niño Costero significó un albedo alto (como se muestra en la Figura 17), llegando a

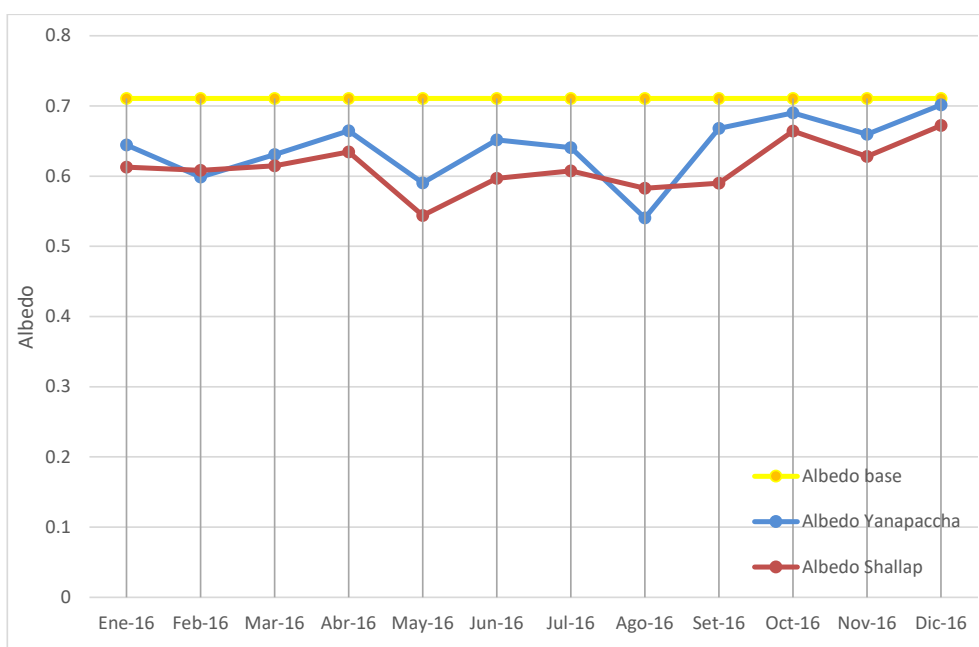


Figura 16. Variación del albedo en los glaciares Yanapaccha y Shallap durante el 2016.

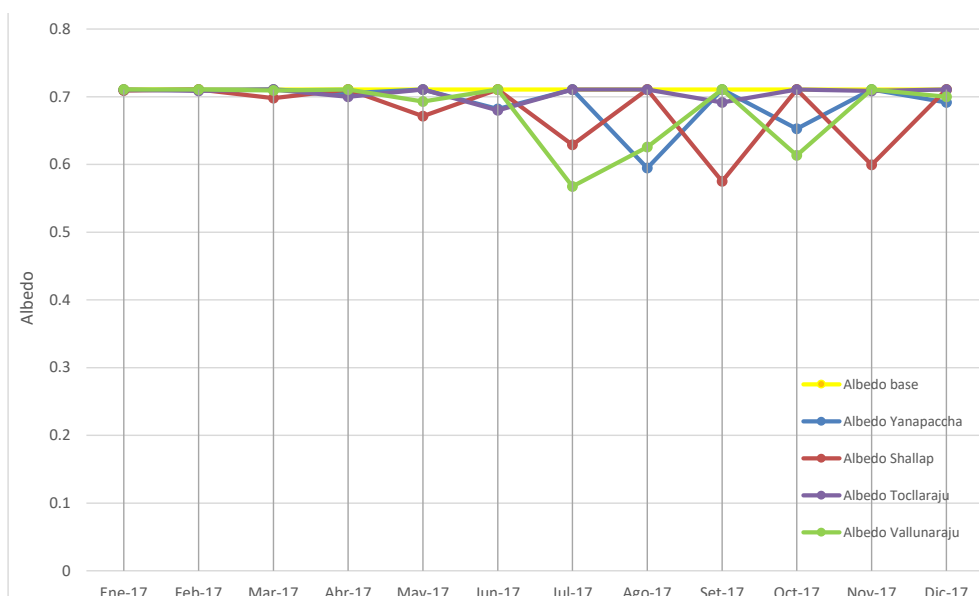


Figura 17. Variación del albedo en los glaciares Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju y Vallunaraju durante el 2017.

ser casi similar a la línea base, 0.710 y 0.708 para febrero en los glaciares Yanapaccha y Tocllaraju, y 0.698 y 0.709 para marzo en los glaciares Shallap y Vallunaraju.

Nieve Fundida por el Carbono Negro

El CN en la nieve genera un mecanismo de retroalimentación positivo denominado forzamiento radiativo, que implica un desequilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja que sale, generando un calentamiento (USEPA, 2012), el cual es transferido a la nieve en forma de calor para acelerar la fusión. Por ello, uno de los objetivos de este estudio es determinar la cantidad de nieve fundida (kg/m^2 o mm w.e.) a causa del carbono negro en los glaciares de la Cordillera Blanca. En la Figura 18, se muestra la variación mensual de nieve fundida en los glaciares Yanapaccha y Shallap, presentando una relación directa con la concentración de CNe, lo cual quiere decir que cuando hay mayor CNe la fusión de nieve es mayor. Un aspecto por considerar es la cantidad de radiación solar que llega sobre los glaciares, que sumada a una alta concentración de CNe, aumenta la cantidad de nieve fundida, como se registra para agosto de 2016 en el glaciar Yanapaccha con $426.57 \text{ kg}/\text{m}^2$, mientras que para el glaciar Shallap es $214.06 \text{ kg}/\text{m}^2$. Sin embargo, la mayor cantidad de nieve fundida durante el 2016 se registra en el glaciar Shallap, con un total de $1950.15 \text{ kg}/\text{m}^2$ equivalente a 3900.30 mm de profundidad de nieve, mientras que en el glaciar Yanapaccha se funde un total de 1947.41

kg/m^2 equivalente a 3894.82 mm de profundidad de nieve.

Durante el Niño Costero, las concentraciones de CNe en la nieve son bajas, lo que representa valores mínimos de fusión de nieve en los glaciares Yanapaccha y Vallunaraju, con 0.84 y $2.02 \text{ kg}/\text{m}^2$ en febrero y marzo, respectivamente (Figura 19), dominando básicamente una capa de nieve limpia y profunda, que a su vez favorece a la reflexión de la luz solar. En general, las LAPs disminuyen la reflectividad de la nieve, pero además pueden afectar en la morfología del grano de nieve, por lo tanto, una baja concentración de CNe se traduce en un albedo alto y una menor tasa de fusión de nieve (Hansen y Nazarenko, 2004). A partir de junio de 2017, la tasa de fusión se incrementa, alcanzando valores máximos durante agosto y septiembre con 283.26 y $212.98 \text{ kg}/\text{m}^2$ en los glaciares Yanapaccha y Shallap, respectivamente. Sin embargo, esto no supera la tasa de fusión máxima registrada durante El Niño del 2016 (426.57 y $214.06 \text{ kg}/\text{m}^2$).

Conclusiones

Encontramos que existe un aumento significativo en las concentraciones de LAPs en la nieve de los glaciares durante El Niño, mientras que las concentraciones alcanzan valores mínimos durante El Niño Costero. El carbono negro, un tipo de LAP, alcanzó concentraciones máximas en mayo y agosto de 2016 con 1047.07 y $1091.75 \text{ ng}/\text{g}$ en los glaciares

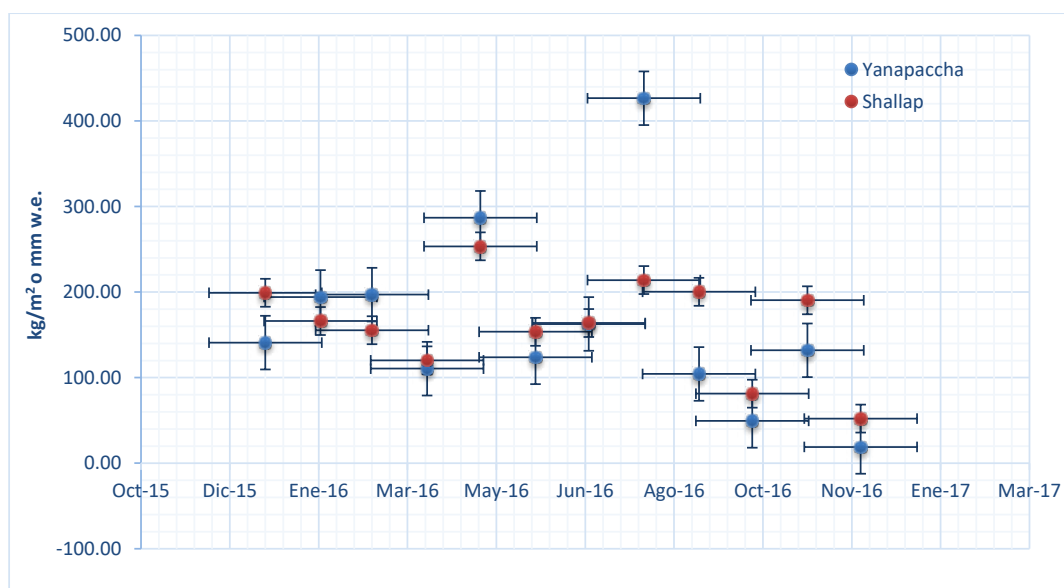


Figura 18. Variación mensual de nieve fundida simulada a causa del carbono negro en los glaciares Yanapaccha y Shallap durante el 2016.

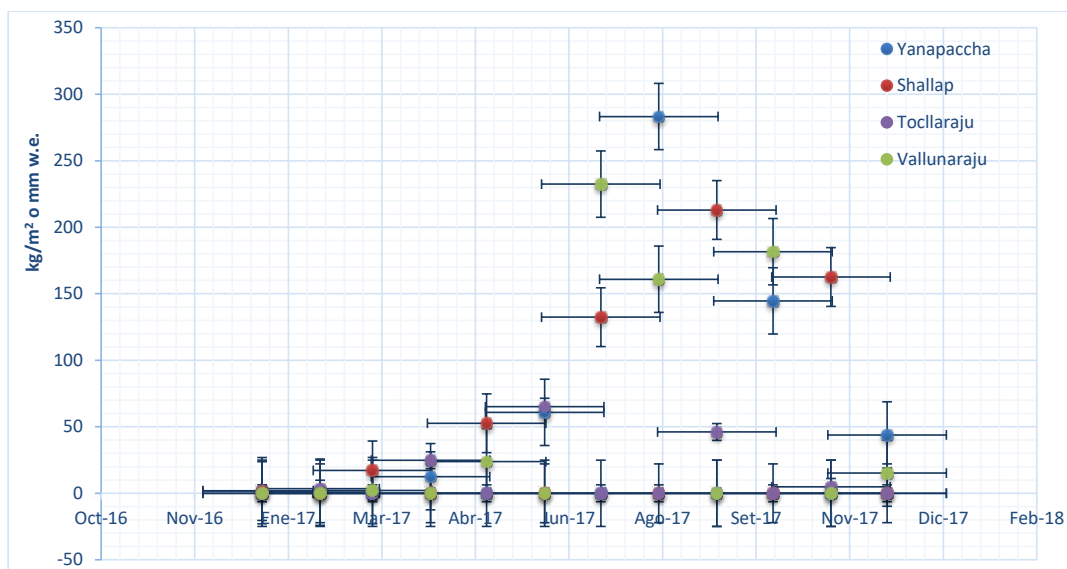


Figura 19. Variación mensual de nieve fundida simulada a causa del carbono negro en los glaciares Yanapaccha, Shallap, Tocllaraju y Vallunaraju durante el 2017.

Shallap y Yanapaccha respectivamente, habiéndose registrado abundantes incendios forestales y quema de pastos en la región dentro de este período. En cambio, durante el 2017 alcanzó valores máximos en julio y septiembre con 780.67 y 706.40 ng/g en los glaciares Vallunaraju y Shallap respectivamente, siendo mayor en los glaciares cercanos a Huaraz en ambos años. Las anomalías provocadas por El Niño Costero significaron la presencia de una abundante cobertura de nieve sobre los glaciares, con lo cual, durante febrero y marzo, se registraron concentraciones mínimas de 0.63 y 1.89 ng/g en los glaciares Yanapaccha y Vallunaraju respectivamente, encontrándose por debajo de la concentración hallada por Doherty et al. (2010) para el Ártico. En general, se registró mayor radiación solar (W/m^2) en la estación meteorológica ubicada en Tinguá (2118 msnm) en comparación con la estación ubicada en Quillcayhuanca (3688 msnm) durante todo el período de estudio (Figura 13), llegando a registrarse valores máximos en noviembre de 2016 y valores mínimos en febrero de 2017 en ambas estaciones meteorológicas, siendo un posible margen de error la altitud de ubicación de las estaciones, ya que no representan con exactitud la radiación solar a más de 4500 msnm.

La reflectancia (albedo) de la nieve en este estudio se relaciona a la concentración de carbono negro efectivo, para lo cual se utilizó el programa de simulación SNICAR (Flanner et al., 2007 y 2009), determinando que, en mayo y agosto del 2016, los valores de albedo llegan a un registro mínimo de 0.544 y 0.540 en los glaciares Shallap y Yanapaccha respectivamente, mientras que durante el 2017

el albedo llega a ser mínimo en julio y septiembre con 0.567 y 0.575 en los glaciares Vallunaraju y Shallap, respectivamente. Estos valores contrastan con las concentraciones máximas de carbono negro efectivo para estos meses. La precipitación de LAPs sobre los glaciares y su posterior acumulación en la superficie debido a la fusión implica un forzamiento radiativo positivo, es decir un calentamiento por el oscurecimiento de la superficie glaciar, lo que se traduce en una temprana fusión de la nieve estacional. En particular, el carbono negro reduce en promedio el 30% del albedo de la nieve, como lo demostraron Casey et al. (2017), basándose en un muestreo cercano a una pista de aterrizaje en la Antártida. Por otro lado, Hansen y Nazarenko (2004) estiman una reducción del albedo en el Ártico de 1.5% y en 5% en áreas del hemisferio norte libres de contaminación atmosférica.

En el caso de los glaciares de la Cordillera Blanca, la permanencia de LAPs cerca de la superficie disminuye el albedo en 15% en promedio, contribuyendo de manera significativa al acelerado retroceso glaciar. El aporte de este estudio es la estimación de la cantidad de nieve fundida en kg/m^2 de manera mensual en los glaciares monitoreados, siendo variante según la concentración de carbono negro efectivo. Sin embargo, la estimación anual de nieve fundida en los glaciares Yanapaccha y Shallap durante el 2016 muestran una similitud en los valores con 1947.41–1950.15 kg/m^2 (equivalente a 3894.82–3900.30 mm de profundidad de nieve) respectivamente, siendo la mayor radiación solar recibida en el glaciar Yanapaccha parte de la explicación de esta similitud, como se registró en la

estación meteorológica ubicada en Tinguá (utilizada como referencia de la radiación solar que llega al glaciar Yanapaccha). En general, la nieve fundida por el carbono negro efectivo es mayor durante El Niño con 3897.56 kg/m² (equivalente a 7795.14 mm de profundidad de nieve) en comparación a los 188.66 kg/m² (equivalente a 377.32 mm de profundidad de nieve) de nieve derretida durante El Niño Costero en los glaciares de la Cordillera Blanca.

Las anomalías provocadas por eventos extremos como El Niño y El Niño Costero conllevan a cambios en el sistema climático, lo que origina la presencia o ausencia de una cobertura de nieve sobre los glaciares, lo cual será clave para reflejar la luz solar, como lo indican Francou et al. (2004). Si consideramos una ausencia de cobertura de nieve y una alta concentración de LAPs sobre los glaciares (durante El Niño), estos perderán mayor cantidad de nieve. En contraste, la presencia de una abundante cobertura de nieve y bajas concentraciones de LAPs (durante El Niño Costero) favorecen a una reflectividad alta, llegando a registrarse durante ambos eventos valores extremos (máximos y mínimos), no registrados durante un año hidrológico sin la presencia de estos eventos.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y el American Climber Science Program (ACSP), a través de un convenio institucional. Agradecemos al Ing. Rafael Tauquino Figueroa por compartir los datos de radiación solar en la web (<http://www.ciiaders.com/>) de forma gratuita, a Jesús Gómez, jefe del Parque Nacional Huascarán por brindarnos su ayuda, a Courtney Cecale por hacer mención de esta investigación en una plataforma informativa de la revista *National Geographic*. Gracias a Jean, Leonel, Jhon, Sergio, Lucas, y otros, por acompañar a las salidas de campo a los diferentes glaciares. Un agradecimiento especial al Dr. Lonnie Thompson por sus comentarios sobre este estudio y por su aprobación para formar parte de la expedición a la capa de hielo de Quelccaya.

Referencias

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J.,... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552. doi:10.1002/jgrd.50171
- Casey, K. A., Kasperi, S. D., Skiles, S. M., Kreutz, K. y Handley, M. J. (2017). The spectral and chemical measurement of pollutants on snow near South Pole, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(12), 6592-6610. doi:10.1002/2016JD026418
- Delaney, I., Kaspari, S. y Jenkins, M. (2015). Black carbon concentrations in snow at Tronsen Meadow in Central Washington from 2012 to 2013: Temporal and spatial variations and the role of local forest fire activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9160-9172. doi:10.1002/2015JD023762
- Doherty, S. J., Warren, S. G., Grenfell, T. C., Clarke, A. D. y Brandt, R. E. (2010). Light absorbing impurities in Arctic snow. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11647-11680, doi:10.5194/acp-10-11647-2010
- Favier, V., Wagnon, P. y Ribstein, P. (2004). Glaciers of the outer and inner tropics: A different behaviour but a common response to climatic forcing. *Geophysical Research Letters*, 31(16), L16403, 1-5. doi:10.1029/2004GL20654
- Favier, V., Wagnon, P., Chazarin, J.-P., Maisincho, L. y Coudrain, A. (2004). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes. *Journal of Geophysical Research*, 109(D18105), 1-15. doi:10.1029/2003JD004359
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T. y Rasch, P. J. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11202), 1-17. doi:10.1029/2006JD008003

- Flanner, M. G., Zender, C. S., Hess, P. G., Mahowald, N. M., Painter, T. H., Ramanathan, V. y Rasch, P. J. (2009). Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(7), 2481-2497. doi:10.5194/acp-9-2481-2009
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V. y Cáceres, B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D18106), 1-17. doi:10.1029/2003JD004484
- Hansen, J. y Nazarenko, L. (2004). Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(2), 423-428. doi:10.1073/pnas.2237157100
- IPCC. (2007). *Climate change 2007 the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. y Miller, H. L. (Eds.). Cambridge y New York, Cambridge University Press.
- Khan, A. L., Dierssen, H., Schwarz, J. P., Schmitt, C., Chlus, A., Hermanson, M.,... McKnight, D. M. (2017). Impacts of coal dust from an active mine on the spectral reflectance of Arctic surface snow in Svalbard, Norway. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 1767-1778. doi:10.1002/2016JD025757
- Menon, S., Koch, D., Beig, G., Sahu, S., Fasullo, J. y Orlikowski, D. (2010). Black carbon aerosols and the third polar ice cap. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 4559-4571. doi:10.5194/acp-10-4559-2010
- Ming, J., Cachier, H., Xiao, C., Qin, D., Kang, S., Hou, S. y Xu, J. (2008). Black carbon record based on a shallow Himalayan ice core and its climatic implications. *Atmospheric and Chemical Physics*, 8, 1343-1352. doi:10.5194/acp-8-1343-2008
- Qian, Y., Flanner, M. G., Leung, L. R. y Wang, W. (2011). Sensitivity studies on the impacts of Tibetan Plateau snowpack pollution on the Asian hydrological cycle and monsoon climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1929-1948. doi:10.5194/acp-11-1929-2011
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L.,... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, 81-102. doi:10.5194/tc-7-81-2013
- Ramanathan, V. y Carmichael, G. (2008). Global and regional climate change due to black carbon. *Nature Geoscience*, 1, 221-227.
- Schmitt, C. G., All, J. D., Schwarz, J. P., Arnott, W. P., Cole, R. J., Lapham, E. y Celestian, A. (2015). Measurements of light-absorbing particles on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 9, 331-340. doi:10.5194/tc-9-331-2015
- SENAMHI. (2017). *Informe técnico N°028-2017/SENAMHI/DMA-SPC*. El Niño Costero 2017 condiciones termo-pluviométricas a nivel nacional. Lima, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Brecher, H. H., Davis, M. E., Leon, B., Les, D.,... Mountain, K. R. (2006). Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(28), 10536-10543. doi:10.1073/pnas.0603900103
- USEPA. (2012). *Report to congress on black carbon*. EPA-450/R-12-001. Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency.
- Walter, D. (2017). Percepciones tradicionales del cambio climático en comunidades rurales Altoandinas en la Cordillera Blanca, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 9-24.
- Wang, X., Doherty, S. J. y Huang, J. (2013). Black carbon and other light-absorbing impurities in snow across Northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(3), 1471-1492. doi:10.1029/2012JD018291
- Warren, S. G. y Wiscombe, W. J. (1980). A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), 2734-2745. doi:10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2

Yallop, M. L., Anesio, A. M., Perkins, R. G., Cook, J. A., Telling, J. P., Fagan, D. E.,... Roberts, N. W. (2012). Photophysiology and albedo-changing potential of the ice algal community on the surface of the Greenland ice sheet. *The ISME Journal*, 6(12), 2302-2313. doi:10.1038/ismej.2012.107

Estimación del Área de la Superficie y el Cambio de Volumen del Glaciar del Nevado Champará (Cordillera Blanca, Perú) a partir de las Imágenes y los Modelos de Elevación Digital del Sensor ASTER / Terra (2000-2010)

Estimation of the Surface Area and Change in Volume of the Glacier of Mount Champará (Cordillera Blanca, Peru) from Digital Elevation Images and Models of the Terra ASTER Sensor (2000-2010)

Joel Rojas Acuña¹ (jrojasa@unmsm.edu.pe) y Juvenal Tordocillo Puchuc² (jtordocillo@gmail.com)

¹Laboratorio de Teledetección, Departamento de Física Interdisciplinaria, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

²Unidad de Postgrado, Laboratorio de Teledetección, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Resumen

El objetivo de este trabajo es la estimación de la variación del área y volumen del glaciar del nevado Champará a partir de las imágenes y los Modelos de Elevación Digital (MED) del sensor ASTER a bordo del satélite TERRA. Se han utilizado siete imágenes ASTER (2000-05, 2003-06, 2003-06, 2006-07, 2007-08, 2009-07, 2010-05) que corresponden al periodo 2000-2010. Para estimar el área del glaciar, se ha utilizado el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y el Índice del Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). La variación del volumen del glaciar para el periodo 2003-2010 se determinó a partir de los MED (con resolución espacial 30 m) obtenidos que se generaron de las bandas 3B y 3N del sensor ASTER, teniendo en consideración las sombras y las nubes sobre el glaciar que generan incertidumbre y eliminando 1533 píxeles (que representan resoluciones espaciales de altitud mayor de 30 m), quedando con 73,035 de un total de 74,568 píxeles. En cuanto a la desglaciación episódica en el periodo 2000-2010, se ha observado una disminución del área glaciar de aproximadamente 50% con relación al año 2000, y la tendencia del ritmo de cambio episódico es de una disminución exponencial. El cambio de volumen glaciar estimado se ajusta a un comportamiento lineal con una tasa aproximada de $-0.085 \text{ m}^3/\text{año}$ para todos los píxeles del MED, y con el enmascaramiento que permite eliminar píxeles anómalos es de $-0.0159 \text{ m}^3/\text{año}$ con un coeficiente de correlación de aproximadamente $R^2=0.9303$ y $R^2=0.9954$, respectivamente. La disminución de altitud acumulada para el periodo 2003-2010 tiende a un comportamiento lineal de aumento negativo de hielo y nieve glaciar del nevado Champará.

Palabras clave: Cambio de volumen glaciar; cambio de área glaciar; Modelos de Elevación Digital, ASTER, NDSI, NDWI

Abstract

The objective of this work is the estimation of the variation of the area and volume of the glacier of Mount Champará from the images and Digital Elevation Models (DEM) of the ASTER sensor on board the TERRA satellite. Seven ASTER images corresponding to the period 2000-2010 (2000-05, 2003-06, 2003-06, 2006-07, 2007-08, 2009-07, 2010-05) have been used. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) and the Normalized Difference Water Index (NDWI) have been used to estimate the area of the glacier. The change in volume of the glacier for the period 2003-2010 was determined from the DEM (with a spatial resolution of 30 m) obtained from bands 3B and 3N of the ASTER sensor, taking into consideration the shadows and clouds on the glacier that cause uncertainty, and eliminating 1533 pixels (with spatial resolutions of altitude greater than 30 m), leaving 73,035 of the total of 74,568 pixels. In terms of the episodic deglaciation in the period 2000-2010, a decrease in the glacial area of approximately 50% in relation to the year 2000 has been observed, and the tendency of the rhythm of episodic change is of an exponential decrease. The estimated glacier volume change conforms to a linear behavior with an approximate rate of $-0.085 \text{ m}^3/\text{year}$ for all the pixels of the DEM and, with the masking which allows elimination of anomalous pixels, is approximately $-0.0159 \text{ m}^3/\text{year}$ with a correlation coefficient of approximately $R^2 = 0.9303$ and $R^2 = 0.9954$, respectively. The decrease in accumulated altitude for the period 2003-2010 tends to a linear

behavior of negative increase of glacial ice and snow of Mount Champará.

Keywords: *Glacial volume change, glacial area change, Digital Elevation Models, ASTER, NDSI, NDWI*

Introducción

En el Perú se encuentran los glaciares tropicales de mayor extensión y con un retroceso debido a su fuerte interacción con las condiciones climáticas locales y globales (Vuille, Kaser y Juen, 2008; Vuille et al., 2008; Vuille, 2013). En la actualidad, las masas glaciares representan uno de los mayores elementos cambiantes y de mayor dinámica en el planeta. En el Perú, el estudio más completo y documentado sobre glaciares fue el primer inventario nacional publicado en 1989 por la empresa de electricidad del norte medio Hidrandina S.A. (Ames, 1989). La elaboración de este inventario se realizó en 13 años y constituye un valioso material de base que permitió cuantificar los cuerpos de hielo en las cordilleras a partir de la información de fotografías aéreas del proyecto N° AF-60-17 vuelo alto USAF de los años 1962 y 1963; en infrarrojo de NASA 1970 y proyecto 62336-002 (44), vuelo alto HYCON de 1955 (Ames, 1985, 1989; UGRH, 2010). Según dicho inventario, se contabilizaron glaciares agrupados en dieciocho cordilleras, con una cobertura glaciaria de 2041.85 km², con espesores que varían entre 13.90 m y 35.24 m, estimándose un volumen de 56,151 km³ de recurso hídrico congelado, siendo el de mayor extensión la Cordillera Blanca con 723.37 km² para el año 1970, según Ames (1989) y para el año 2003, la superficie glaciaria fue de 527.62 km², según UGRH (2010), con una disminución del 27% en 33 años. En las décadas 1970-2010, los glaciares se han convertido en fuentes naturales de información como indicadores del cambio climático y por tanto pueden ser monitoreados mediante las técnicas de teledetección a través del análisis y la interpretación de imágenes digitales multiespectrales. La metodología, con la precisión adecuada, es una herramienta útil para cuantificar los cambios de las variables físicas como área y volumen glaciario. Los primeros estudios, aplicados al seguimiento espacial y temporal de los glaciares, se llevaron a cabo en los glaciares de los Alpes suizos, mediante la digitalización de las imágenes del sensor TM del satélite LANDSAT 5 con datos imágenes (1985-1999), permitiendo obtener información de los cambios de aproximadamente 930 glaciares alpinos, mostrando la importancia de las imágenes de satélite.

Estudios posteriores se han realizado en otros nevados del mundo con imágenes de satélite y en algunos casos con mayor resolución espacial al ASTER y LANDSAT, permitiendo obtener resultados favorables. Con respecto a los glaciares tropicales como la Cordillera Blanca en Perú, estudios sobre balance de masa glaciario y la interacción climatoglaciaria, se encuentran documentadas en Kaser y Georges (1999), Kaser (2001) y Mark y Seltzer (2005), mientras las variaciones del balance de masa glaciario que responden a fluctuaciones en el clima a gran escala, dominadas por las condiciones del Pacífico tropical, con el ENSO como factor principal en la variabilidad interanual que causa anomalías positivas de balance de masa durante los eventos de “La Niña” y anomalías negativas durante “El Niño”. En la Cordillera Blanca, se encuentran los trabajos de Vuille, Kaser y Juen (2008), Vuille et al. (2008) y Vuille (2013) que resaltan la importancia del estudio glaciario para entender, en su contexto general, el comportamiento climático y su vínculo con el retroceso de los glaciares. Los trabajos de estimación de área y volumen glaciario con imágenes ópticas para evaluar patrones espaciales y temporales de retroceso glaciario en algunos nevados integrantes de Cordillera Blanca son cuantificados (Cerna Arellan, 2012; Duran-Alarcón et al., 2015; Francou et al., 2013; Silverio y Jaquet, 2005, 2009, 2017).

El uso de imágenes satelitales también fue aplicado a otras cordilleras andinas como al nevado Coropuna (Perú) realizado por Racoviteanu et al. (2007), a la Cordillera Huaytapallana (López-Moreno et al., 2014) y estudios de valoración del peligro de los lagos, formados en los glaciares de difícil acceso, basado en datos ETM+ y MED de imágenes ASTER en la Cordillera Carabaya (Huggel et al., 2004). Así mismo, estudios de balance de masa en latitudes bajas para la Cordillera Blanca, con datos in situ, muestran que la densidad del hielo glaciario varía muy poco, como en el caso del glaciar Artesonraju (Kaser y Georges, 1999).

Las imágenes ASTER tienen un periodo de 16 días, lo cual registra imágenes en gran parte con mantos de nubes sobre el glaciar, dificultando el uso de dichas imágenes ópticas, de las cuales se han elegido las que presentan menor nubosidad, encontrándose siete imágenes en el periodo 2000-2010 adecuadas para realizar estudios cuantitativos de variación de área y volumen glaciario. Según las referencias antes mencionadas, se encuentran estudios basados

en el umbral del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NSDI, por sus siglas en inglés) y técnicas de postprocesamiento para delimitar el área de los glaciares (Huggel et al., 2004; Cerna Arellan, 2012; Kaser y Georges, 1999; Durán-Alarcón et al., 2015; y Silverio y Jaquet, 2005, 2009, 2017).

En ese contexto, el objetivo principal del presente estudio es el desarrollo de una metodología usando la información satelital proveniente del sensor ASTER para cuantificar la variación del área glaciaria y la estimación del volumen glaciario a partir de modelos de elevación digital que corresponden al nevado Champará. Por su ubicación, Champará se encuentra muy alejado de las poblaciones rurales, con abrupta geografía y de difícil acceso para la toma de datos in situ. En ese sentido, la teledetección es una técnica valiosa que cuantifica la evolución glaciaria, mostrando evidencias de los cambios espaciales y temporales para la atención necesaria y urgente de adaptación a dichos cambios y consecuencias que repercutirían en el sistema económico y social del país.

Área de Estudio y Datos

Área de Estudio

El área de estudio es el nevado Champará que se encuentra ubicado entre las coordenadas de las latitudes Sur $8^{\circ}37'$ y $8^{\circ}43'$ y entre las longitudes Oeste $77^{\circ}45'$ y $77^{\circ}49'$ (UGRH, 2010). El nevado

alcanza alturas mínimas de 4811 msnm hasta una altitud máxima de 5750 msnm. Se ubica en el distrito de Yuracmarca (provincia de Huaylas) y en los límites de los distritos de la Pampa y Cusca, que pertenecen a la provincia de Corongo, departamento (o región) de Ancash, Perú, (Figura 1). Según la Figura 2, el nevado Champará se encuentra rodeado de profundas quebradas por el sur (Champará y Quisuarillo), norte (Tutapac) y noreste (Cullohuaylla). Los lagos que circundan el nevado dan origen a los ríos más importantes, como el río Racuay que va hacia el este y luego retorna para ser afluente del río Quitaraca. El río Coyllorcocha es afluente del río Coronguillo, siendo ambos ríos afluentes del río Santa, cuyas aguas contribuyen a la Central Hidroeléctrica de Cañón del Pato, una de las más importantes fuentes generadoras de energía eléctrica del país (UGRH, 2010; Tordocillo y Rojas, 2012, 2013). El nevado Champará no está considerado como parte del Parque Nacional Huascarán, una reserva nacional creada en 1975 y declarada Patrimonio Natural de la Humanidad y Reserva de la Biósfera por la UNESCO en 1985 (<http://en.unesco.org/>, acceso: 25-02-2014).

Champará se encuentra al norte de la parte principal de la Cordillera Blanca y por tanto el escenario climático es muy parecido, presentando dos estaciones muy marcadas, seca para los meses de mayo a septiembre y lluviosa de octubre a abril (Ames, 1985, 1989). Así, la mayor incidencia de precipitaciones ocurre durante los meses del

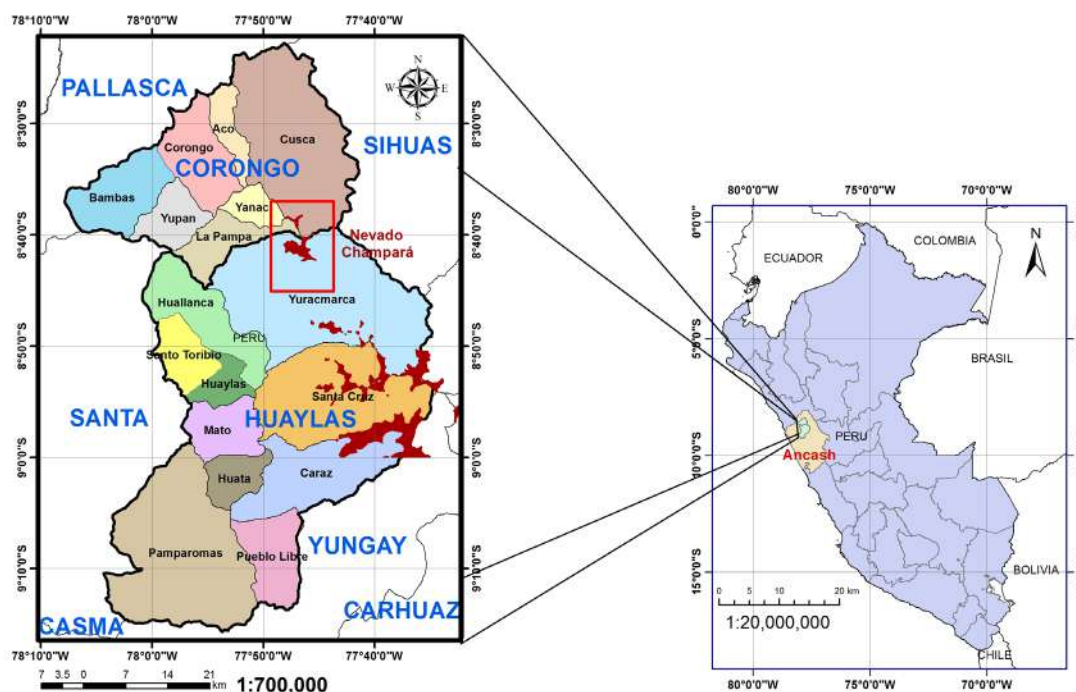


Figura 1. Ubicación geográfica del nevado Champará (cuadro rojo) en la región Ancash (Tordocillo, 2015).

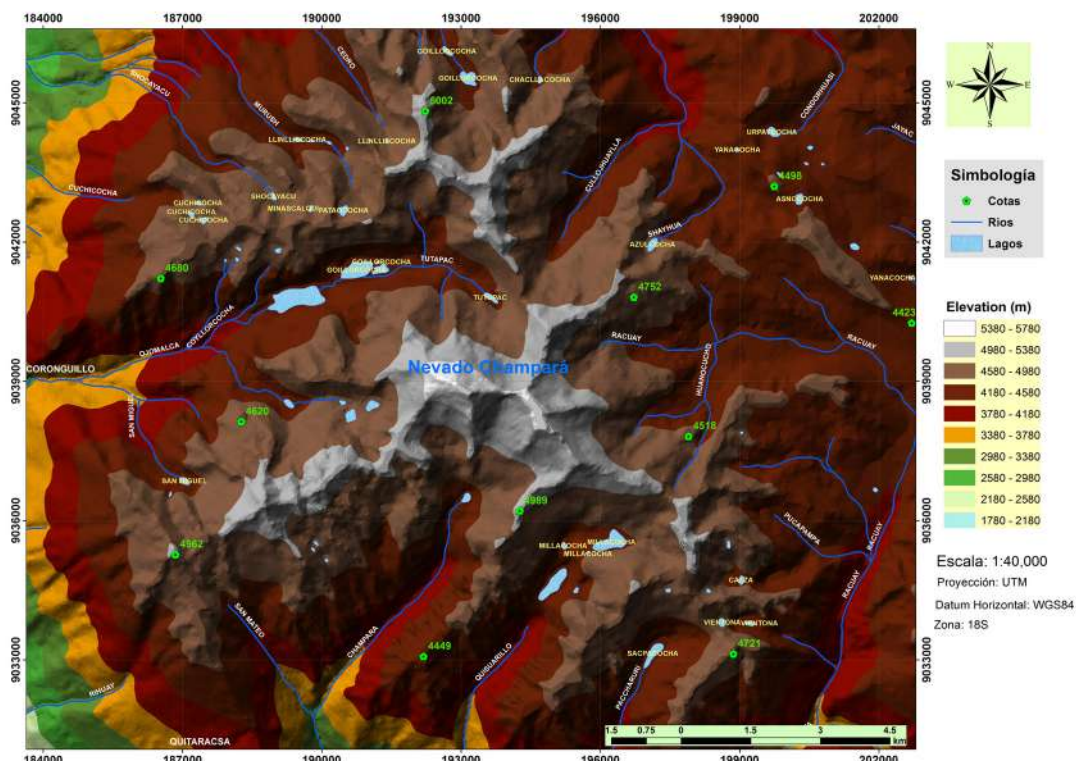


Figura 2. TIN generado a partir de curvas de nivel del IGN, se representa la altitud cada 400 m según color de leyenda. Se muestran los ríos, lagos y cotas más importantes que rodean al nevado Champará en la región Ancash (Tordocillo, 2015).

verano austral, que coincide con el incremento de la temperatura en la región (Ames, 1989; Francou et al., 2013). En general, las precipitaciones sólidas superan a las lluvias en altitudes superiores a los 4000 msnm, pero la nieve que cubre las laderas por debajo de la línea de nieve tiene una duración efímera debido al alto grado de insolación (Figura 3a; Vuille, Kaser y Juen, 2008). Los estudios por Vuille et al. (2000, 2008) de la temperatura en la Cordillera Blanca, considerando su valor a una altura de 1.5 metros del suelo de 1939 y 1994-1998, usando los datos de 268 estaciones ubicadas entre los paralelos 1°N y 23°S, entre 0 y 5000 msnm, indican que las temperaturas sobre los Andes Tropicales se incrementaron en rangos de 0.10-0.11 °C por década desde 1939 (Figura 3b). Estudios recientes por Schauwecker et al. (2014) en la Cordillera Blanca confirman los cambios de temperatura con incrementos de 0.13 °C en las tres últimas décadas. La variabilidad de las precipitaciones se relaciona con el ENSO según Vuille, Bradley y Keimig (2000), Vuille et al. (2008), Francou et al. (2013) y López-Moreno et al. (2014). Durante la ocurrencia de los eventos cálidos como El Niño, hay un incremento de la precipitación, y durante la ocurrencia de eventos como La Niña, un déficit de lluvia tiende a producirse en todas las zonas con cobertura glaciaria de la Cordillera Blanca y con una atenuación paulatina hacia el sur.

Datos - Imágenes del Sensor ASTER

Los datos de imágenes del sensor ASTER son de nivel L1A y son considerados como los datos originales o crudos, sin procesar y reconstruidos directamente del instrumento en resolución completa. Estos se componen de los datos de imágenes, los coeficientes radiométricos, geométricos y de otros datos auxiliares que acompañan a la imagen original, manteniendo así los valores de los datos originales. A su vez, las imágenes ASTER cubren en cada escena 60 km x 60 km. El criterio de selección de las imágenes es por su mínima nubosidad en el área de estudio en el periodo 2000-2010. De esa manera, se encontraron siete imágenes ASTER L1A, en formato HDF de la USGS, con sus características indicadas en la Tabla 1. Ellas fueron descargadas de internet (<http://glovis.usgs.gov/>, acceso: 25-04-2011).

Información Auxiliar

En la generación del MED, se utilizó la Carta Nacional Digital a escala 1:100,000 procedente del Instituto Geográfico Nacional, en formato vectorial con curvas de nivel, de distancias de 50 m, correspondiente al año 2001, con proyección cartográfica Universal Transversa Mercator (UTM), Datum WGS84 y Zona 18S. Además, se elaboró un MED con una resolución espacial de 30 m usando interpolación a

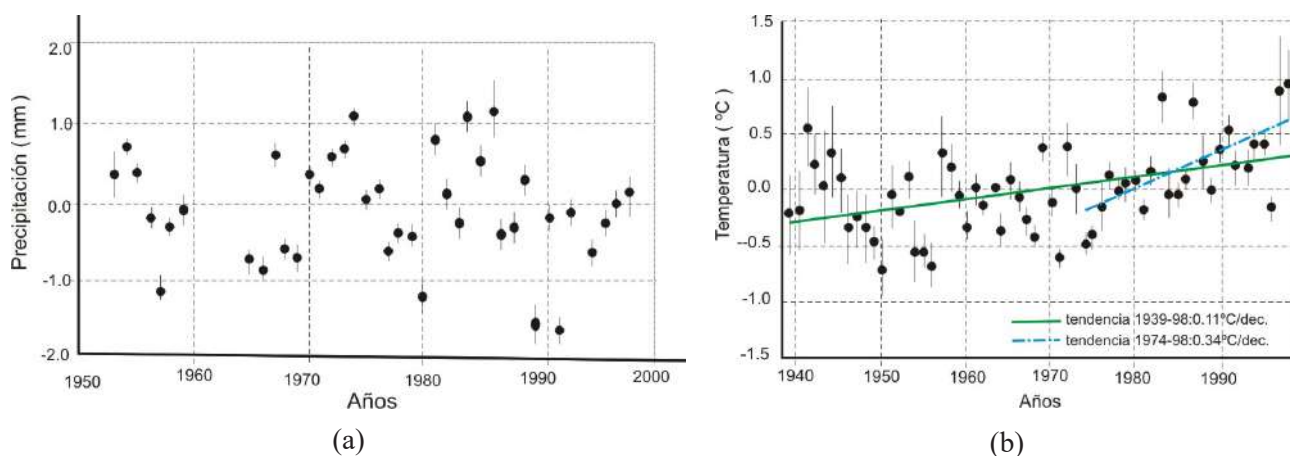


Figura 3. (a) Precipitación total anual de 45 estaciones en Perú sobre 3000 msnm entre 1953 y 1998; (b) Temperatura en los Andes Tropicales 1939-1998 (Vuille, Bradley y Keimig, 2000).

Tabla 1. Datos de imágenes del Sensor ASTER L1A y sus principales características.

Nº	Nivel	Fechas	Hora UTC	Acimut Solar	Elevación Solar
01	AST_L1A	26 May, 2000	15:49:05	35.5°	54.5°
02	AST_L1A	11 Jun, 2003	15:40:11	34.2°	51.1°
03	AST_L1A	13 Jun, 2003	15:39:23	37.4°	51.0°
04	AST_L1A	21 Jul, 2006	15:39:40	39.1°	52.3°
05	AST_L1A	25 Ago, 2007	15:40:12	50.0°	59.7°
06	AST_L1A	29 Jul, 2009	15:40:12	41.0°	53.5°
07	AST_L1A	29 May, 2010	15:40:00	35.2°	52.6°

30 m. Estas curvas de nivel son de libre acceso del portal de descarga por internet (<http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>, acceso: 25-04-11). Finalmente, se utilizó una imagen del sensor ETM+ a bordo del satélite LANDSAT-7 orto-rectificada del 29 de julio 2000 como imagen maestra o base para corregir geométricamente mediante el procedimiento “imagen a imagen” en el ENVI-IDL.

Metodología

La teledetección proporciona herramientas que mejoran la eficiencia y el uso de imágenes satelitales que permiten delimitar la línea glaciar para cuantificar el área glaciar y estimar la variación de volumen a partir de modelos de elevación generados de imágenes ASTER, siguiendo metodologías propuestas por la literatura internacional: Bolch, Menounos y Wheate (2010), Cerna Arellan (2012), Chen y Ohmura (1990), Reinhardt y Rentsch (1986), Liang y Li (2008), y Tordocillo y Rojas (2012, 2013). El procesamiento inicial de las imágenes ASTER involucra la calibración, corrección atmosférica, corrección geométrica y corrección topográfica. Estas correcciones permiten un mayor realce en las imágenes para estimar el área y el volumen de la

cobertura glaciar (Tordocillo, 2015). La secuencia de la metodología se muestra en el diagrama de la Figura 4.

Procesamiento de Imágenes ASTER

La calibración de las imágenes VNIR-ASTER de nivel L1A consiste en la conversión del número digital (ND) a valores de radiancia ($Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$). Los números digitales (ND) están cuantizados a enteros de 8 bits ($ND = 0 \dots, 255$). Para convertir estos números digitales (ND) a números digitales escalados o calibrados (radiancia), los números digitales de Level-1A del VNIR ASTER son transformados sobre la base de detector por detector usando los valores de Slope/Inclination (A), Gain (G) y Offset (D) de los valores de la Tabla 2 de Coeficientes de Calibración Radiométrica ($RCC = Radiometric Conversion Coefficients$) que son adicionados en el archivo HDF-EOS de datos L1A.

Los RCC determinan como los números digitales (ND) de Level-1A son convertidos en números digitales calibrados de Level-1B. La información de “gain” y “offset” en la tabla RCC es usada en la conversión, información de las fuentes de calibración durante el vuelo. La Tabla 2 de RCC es una de las

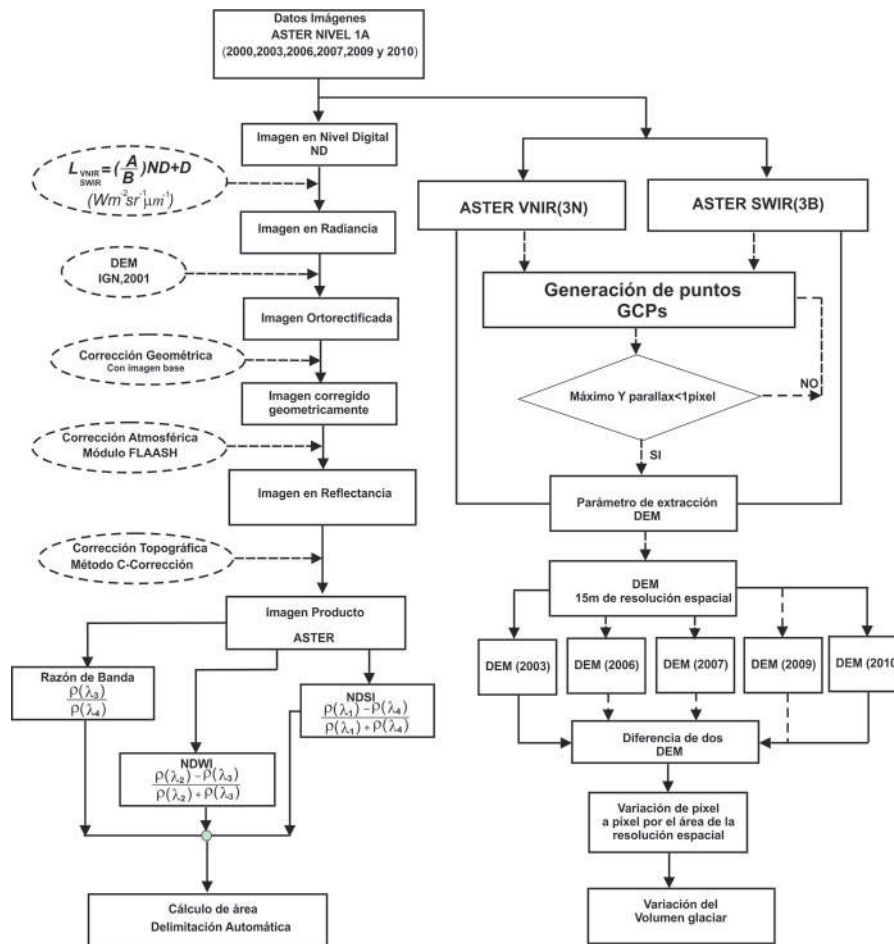


Figura 4. Diagrama de flujo para la estimación del área y el cambio de volumen del nevado Champará.

Tabla 2. Coeficientes de Calibración Radiométrica (RCC).

Banda VNIR 1,2,3N				VNIR 3B			
Detector N°	4 Bytes	4 Bytes	4 Bytes	Detector N°	4 Bytes	4 Bytes	4 Bytes
1	D[0]	A[0]	G[0]	1	D[0]	A[0]	G[0]
2	D[0]	A[0]	G[0]	2	D[0]	A[0]	G[0]
3	D[0]	A[0]	G[0]	3	D[0]	A[0]	G[0]
4	D[0]	A[0]	G[0]	4	D[0]	A[0]	G[0]
..
..
4098	D[4097]	A[4097]	G[4097]	4998	D[4997]	A[4997]	G[4997]
4099	D[4098]	A[4098]	G[4098]	4999	D[4998]	A[4998]	G[4998]
4100	D[4099]	A[4099]	G[4099]	5000	D[4999]	A[4999]	G[4999]

varias tablas de los datos ASTER de Level-1A que contiene tres columnas. Estos tres conjuntos de valores son proporcionados por cada sensor, banda (canal) y detector. Cada fila corresponde a un detector específico (por ejemplo, la tabla RCC para las bandas VNIR incluye las columnas del offset, slope/inclination, y gain para cada uno de los 4100 detectores de las bandas 1, 2 y 3N, y 5000 detectores de la banda 3B). Esto es consistente con la configuración de vuelo del sensor pushbroom del VNIR en la dirección a lo largo de la trayectoria. El diagrama de la relación Detector–Posición del Píxel (Figura 5) dibuja la relación entre el número del detector y la posición de la imagen, siendo la relación invertida para las bandas

VNIR y SWIR. El detector número 1 corresponde al píxel de la columna del extremo izquierdo para las bandas VNIR, mientras que le corresponde al píxel de la columna del extremo derecho para las bandas SWIR. Los Números Digitales, ND, Level-1A VNIR/SWIR ASTER pueden ser convertidos a radiancia del sensor (Abrams y Hook, 2002; Abrams et al., 2015):

$$L_{VNIR,SWIR} = \left(\frac{A}{G}\right) * V + D \quad (1)$$

donde L es la radiancia escalada (in W/m²/sr/μm); A es el coeficiente lineal (slope/inclination); G es el gain; D es el offset y V es la señal (valor del ND).

Corrección Geométrica

La corrección geométrica permite eliminar los errores de carácter geométrico que acompañan al proceso de adquisición de datos, así como asignar a la imagen de coordenadas geográficas de tal forma que sea posible compararla con otra imagen o con información extraída de un mapa, procurando que la imagen resultante de estos procesos conserve, en lo posible, los valores radiométricos de la imagen inicial. La corrección geométrica de las imágenes ASTER se realizó en dos fases, siendo la primera a través del módulo de georreferenciación de las imágenes ASTER del submenú del ENVI y usando los datos de geolocalización que se encuentra en el header de las imágenes EOS-HDF (Vuille, Kaser y Juen, 2008). La segunda es a través del submenú registración (select

GCPs: image to image) del ENVI 4.7 tomando como imagen base la imagen del sensor ETM+ (29-07-2000). Se recolectaron 46 puntos de control (Tabla 3) con un error cuadrático medio (ECM) de ± 0.46 con la finalidad de minimizar los errores geométricos (Kaser, 2001; Teillet, Guindon y Goodenough, 1982). Aquí no se cuenta con puntos GPS, pero los puntos obtenidos se compararon con los puntos obtenidos de las imágenes del Google Earth, dando resultados satisfactorios con un error menor al ± 6 m (Liang y Li, 2008).

Corrección Atmosférica de las Imágenes ASTER

La corrección atmosférica de las imágenes se realizó mediante el denominado MODULO FLAASH sobre el software de procesamiento de

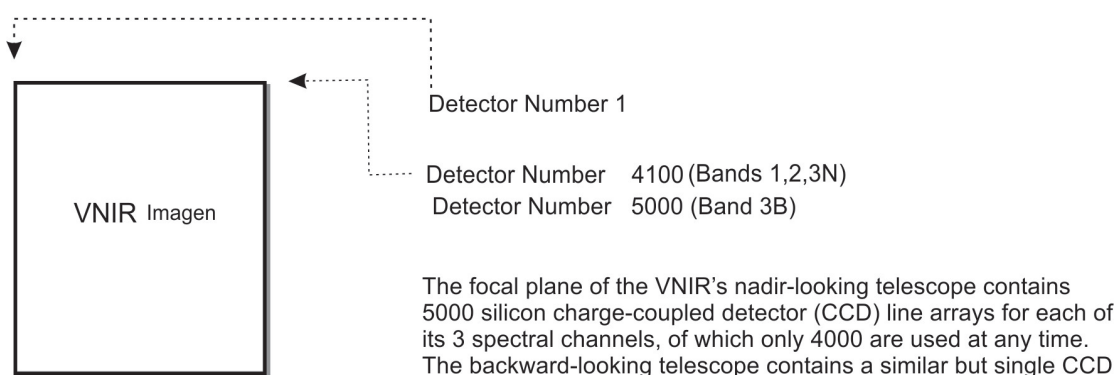


Figura 5. Relación de la posición del detector – pixel para sensores VNIR (visible near-infrared) y SWIR (shortwave infrared) del ASTER.

Tabla 3. Puntos GCPs de imagen base ETM+ con la imagen esclavo ASTER.

	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#4+	3385.75	7644.25	2384.25	2833.25	2384.4346	2833.4558	0.1846	0.2058	0.2765
#5+	3983.00	8545.25	2982.00	3734.50	2981.7339	3734.4005	-0.2661	-0.0995	0.2841
#6+	2713.75	7096.25	1714.00	2285.50	1712.4264	2285.5055	-1.5736	0.0055	1.5736
#7+	5457.75	7858.25	4455.25	3047.00	4456.0929	3047.3300	0.8429	0.3300	0.9052
#8+	3459.00	5474.00	2457.75	663.25	2457.2476	663.2485	-0.5024	-0.0015	0.5024
#9+	5905.75	5486.50	4903.50	675.50	4903.8165	675.6202	0.3165	0.1202	0.3386
#10+	2552.00	5312.00	1550.26	501.20	1550.2766	501.2990	0.0166	0.0990	0.1004
#11+	1575.00	8415.00	574.84	3604.16	574.2207	3604.2978	-0.6193	0.1378	0.6345
#12+	3062.00	8851.25	2061.28	4040.37	2060.9997	4040.4497	-0.2803	0.0797	0.2914
#13+	5102.00	5528.00	4100.02	717.16	4100.1318	717.1612	0.1118	0.0012	0.1118
#14+	2003.50	6109.75	1001.25	1299.00	1002.0233	1299.0633	0.7733	0.0633	0.7759
#15+	5265.50	6850.25	4263.58	2039.37	4263.7664	2039.3678	0.1864	-0.0022	0.1864
#16+	4996.00	8731.00	3994.29	3920.07	3994.5367	3920.0846	0.2467	0.0146	0.2471
#17+	5076.00	7576.25	4074.50	2765.75	4074.3799	2765.3596	-0.1201	-0.3904	0.4085
#18+	1795.50	8705.50	794.25	3895.00	794.7533	3894.7796	0.5033	-0.2204	0.5495
#19+	4804.25	9432.50	3802.50	4622.00	3802.9232	4621.5786	0.4232	-0.4214	0.5972
#20+	4121.75	9349.75	3120.25	4538.75	3120.5862	4538.8733	0.3362	0.1233	0.3581
#21+	3370.50	9203.00	2369.50	4392.50	2369.4984	4392.1733	-0.0016	-0.3267	0.3267
#22+	4255.00	6248.00	3253.22	1437.17	3253.3110	1437.1885	0.0910	0.0185	0.0928
#23+	4406.00	5534.75	3404.12	723.90	3404.1863	723.9475	0.0663	0.0475	0.0816
#24+	1875.00	7967.00	874.14	3156.25	874.0366	3156.2877	-0.1034	0.0377	0.1100
#25+	3442.00	8478.00	2440.81	3667.23	2440.8384	3667.1845	0.0284	-0.0455	0.0536

imágenes ENVI 4.7. Este módulo emplea algunas subrutinas previamente validadas, como es el caso del DISORT, el cual calcula las condiciones atmosféricas (visibilidad, nubosidad, gradientes de temperatura y humedad, vapor de agua y CO₂) y la función de transferencia con base en los parámetros ópticos en cada fecha (Cortés, 2009; ITT, 2009; Tordocillo, 2015).

Antes de aplicar el módulo FLAASH a las imágenes ASTER, se consideraron los parámetros requeridos (Tabla 4). Posteriormente, es necesario dividir por un factor de escala de 10, de tal forma que se obtengan de dicha transformación en unidades mW.m⁻².µm⁻¹.sr⁻¹ que coincidan con las unidades que usa FLAASH µW.cm⁻².nm⁻¹.sr⁻¹ (ITT, 2009).

Corrección Topográfica de las Imágenes ASTER

El fundamento matemático y estadístico de la corrección C es un método empírico-estadístico, se basa en el análisis de regresión simple. La idea del método es realizar un ajuste semiempírico de manera que disminuya la correlación existente entre ambas variables, así el incremento del número digital se debe más a la respuesta de la radiación ante una determinada superficie (cubierta) de interés que el aporte de la fuente de iluminación. El método de corrección C asume una correlación lineal entre la reflectancia de cada banda e incidencia solar local

(IL) de la forma (Teillet, Guindon y Goodenough 1982; Tordocillo, 2015):

$$\rho_T = b_k + m_k IL \quad (1)$$

donde m_k es la pendiente de la línea de regresión, en la banda k , ρ_H es la reflectancia de la superficie horizontal y ρ_T es la reflectancia de la superficie inclinada. Se considera la ecuación de una recta de la ecuación (1), con una pequeña variación de la pendiente (m_k) a medida que la variable independiente (IL) cambia la variable dependiente (b_k), lo hará, pero lentamente; es decir, el valor de esta variable no aumenta demasiado manteniéndose constante. La idea es tratar de mantener estables las variables involucradas y se logra de la siguiente manera:

$$\rho_H = \rho_T \left(\frac{\cos\theta_i + c_k}{IL + c_k} \right) \quad (2)$$

donde $c_k = \frac{b_k}{m_k}$ se basa en el enfoque empírico-estadístico y el modelo introduce un parámetro c_k , que es el cociente entre el gradiente de b_k y la intersección m_k de la regresión ρ_T versus IL.

Estas fórmulas para la corrección topográfica se han implementado en programas en código IDL descritas en Canty (2006) y Tordocillo (2015) y se utilizaron para las siete imágenes del sensor ASTER, con los parámetros de entrada de la Tabla 1 y el MED generado a partir de las curvas de nivel. Esta corrección

Tabla 4. Datos de entrada en el módulo FLAASH de ENVI-IDL 4.7.

Años	2000	2003	2006	2007	2009	2010
Escena Central	-8.5222/ -77.5346	-8.7145/ -77.7447	-8.7048/ -77.8130	-8.6947/ -77.8841	-8.7144/ -77.7463	-8.7093/ -77.7813
Hora	15:49:05	15:39:23	15:39:40	15:40:12	15:40:12	15:40:03
Altura(km)	4.7	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5
Tipo de Sensor	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER	ASTER
Tamaño de pixel(m)	15	15	15	15	15	15
Fecha de Captura	26-05-2000	11-06-2003	21-07-2006	25-08-2007	29-07-2009	29-05-2010
Modelo Atmosférico	Tropical	Tropical	Tropical	Tropical	Tropical	Tropical
Modelo de aerosol	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural
Visibilidad inicial(km)	40	40	40	40	40	40
Aerosol Retrieval	2-Band(K-T)	2-Band(K-T)	2-Band(K-T)	2-Band(K-T)	None	None

es muy importante para zonas con pendientes muy elevadas (véase Figura 6) donde se observa la imagen izquierda con corrección topográfica y la imagen derecha sin corrección topográfica, observándose cambios significativos y la influencia de las nubes sobre el glaciar.

Cálculo del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada

Las operaciones básicas como suma, resta y división en las imágenes en reflectancia es parte de las técnicas de procesamiento de imágenes en teledetección esto permiten efectuar una división pixel a pixel entre las reflectancias de dos o más bandas de la imagen producto. Para separar las áreas con glaciar y no glaciar, siguiendo las recomendaciones de Kääb (2005), la clasificación de nieve por el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI, por sus siglas en inglés) de imágenes producto ASTER, es a partir de la relación:

$$NDSI_{ASTER} = \frac{\rho(\lambda_1) - \rho(\lambda_4)}{\rho(\lambda_1) + \rho(\lambda_4)} \quad (3)$$

donde $\rho(\lambda_1)$ y $\rho(\lambda_4)$ es la reflectancia de las bandas 1 y 4 de la imagen ASTER. A su vez, considerando que existen lagos y cuerpos de agua a temperaturas próximas a la congelación, es necesario el uso del Índice del Agua de Diferencia Normalizada

(NDWI, por sus siglas en inglés) que permite extraer cuerpos de agua que poseen una distribución espacialmente estable en el tiempo, según la siguiente relación (Schicker, 2006):

$$NDWI_{ASTER} = \frac{\rho(\lambda_2) - \rho(\lambda_3)}{\rho(\lambda_2) + \rho(\lambda_3)} \quad (4)$$

donde $\rho(\lambda_2)$ y $\rho(\lambda_3)$ es la reflectancia de las bandas 1 y 3 de la imagen ASTER.

Extracción de Modelos de Elevación Digital a partir de Imágenes ASTER

Las imágenes ASTER, para este estudio, son de Nivel 1A. Este tipo de imágenes tiene un par estereoscópico que se genera al combinar imágenes repetidas del terreno con diferentes ángulos de visión, es decir, la banda 3N (0.78 - 0.86 μm) que cubre una extensión de 4100 x 4200 píxeles, y tiene una vista en la vertical y la banda oblicua 3B (0.78 - 0.86 μm) que cubre una extensión de 5000 x 5400 píxeles, con un ángulo de 27.6° hacia atrás sobre el terreno (Abrams y Hook, 2002; Abrams et al., 2015). Para la extracción del MED, se corrigió con puntos conjugados de las dos imágenes 3N y 3B, generando 100 puntos GCPs. De igual forma, la transformación a la geometría epipolar y la conversión de paralaje al MED se realizaron bajo el entorno del programa ENVI 4.7, siguiendo los procedimientos de Oñate-

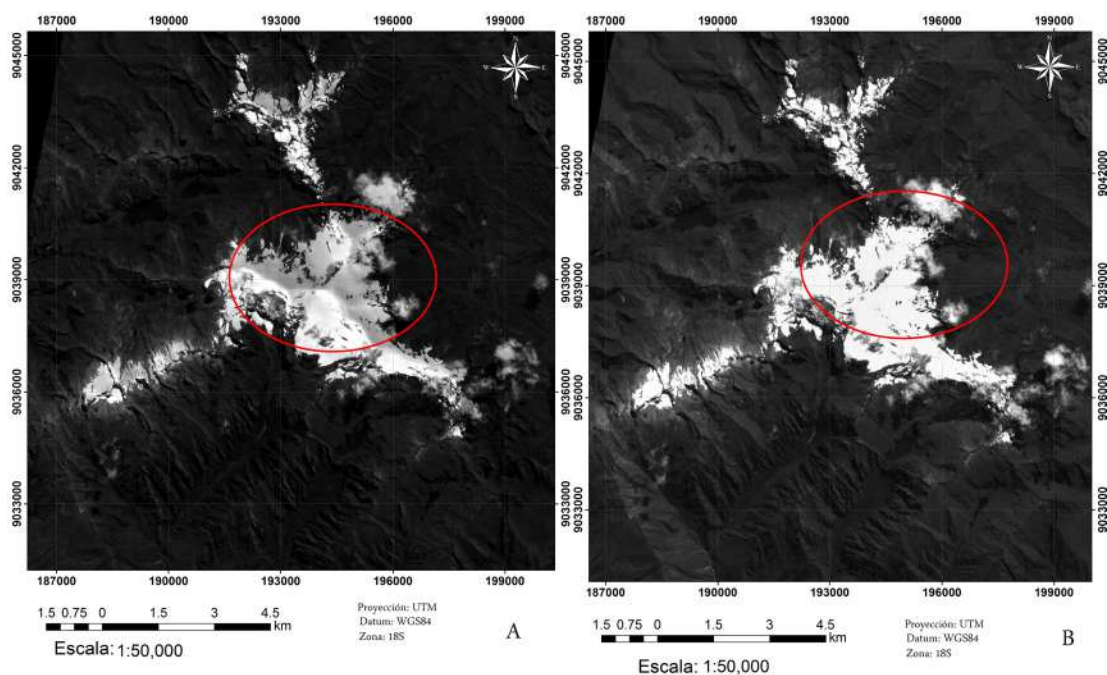


Figura 6. Imágenes del sensor ASTER del 26 de mayo 2000: (a) Canal 1 con corrección topográfica, (b) Canal 1 sin corrección topográfica (Tordocillo, 2015).

Valdivieso y Bosque Sendra (2007). Además, la línea de visión de un punto individual sobre la imagen se intersecta con el elipsoide de la Tierra, y la posición resultante en el elipsoide es corregida con su punto de elevación actual, esto se calcula a partir de la diferencia de paralaje 3N-3B de los GCPs (Abrams y Hook, 2002; Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra, 2007). Con los puntos GCPs para cada modelo de elevación, se encontró un error medio cuadrático global (RMSE) de ± 0.81 píxeles para cada escena, y los principales errores de los modelos de elevación extraídos de la imagen ASTER para cada escena son principalmente en las zonas cercanas a la cima del nevado y en las zonas con sombras dejando errores verticales considerables, que son atribuidos principalmente a la exposición del nevado al satélite y a la abrupta topografía. En ese sentido, la mejor opción que reduce el error significativamente es a través del uso del software especializado (Rivera y Casassa, 1999; Käab, 2008).

Extracción de Cambio de Volumen Glaciar mediante Modelos de Elevación Digital

La estimación del cambio de volumen de la cobertura nieve-hielo del nevado se basa en la evaluación de la diferencia de elevación entre dos superficies del nevado multiplicada por la resolución

del píxel (Abdalati et al., 2004; Abermann et al., 2009; Surazakov y Aizen, 2006; Hirano, Welch y Lang, 2003; Pan et al., 2012; Käab, 2008).

$$\Delta V = (DEM_2 - DEM_1)A = A(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n) = A \sum_{i=1}^n (\Delta h_i) \quad (5)$$

donde ΔV es el cambio de volumen, Δh_1 es la diferencia de elevación del píxel \bar{i} , A es el área de la resolución del píxel y n es el número de píxeles. Para llevar a cabo la sustracción de dos modelos de elevación digital y para la estimación de volumen glaciar, se procedió con el criterio según la Figura 7, cuantificando la variación de volumen según la ecuación (5). Para el cálculo del espesor medio ($\Delta \bar{Z}_{\Delta t}$) del nevado, se consideró la siguiente expresión (Abermann et al., 2009, 2010):

$$\Delta \bar{Z}_{\Delta t} = \frac{\Delta V}{0.5(A_{t1} + A_{t2})} \quad (6)$$

donde A_{t1} es el área calculada en el tiempo (t_1) y A_{t2} es el área calculada en el tiempo (t_2).

La metodología consiste en trazar un área glaciar de nieve y hielo en la imagen ASTER del año 2000, según se observa visualmente en la Figura 8, que la nieve temporal cubre por debajo de la línea glaciar sólida habitual. A partir de esta referencia, se extrae

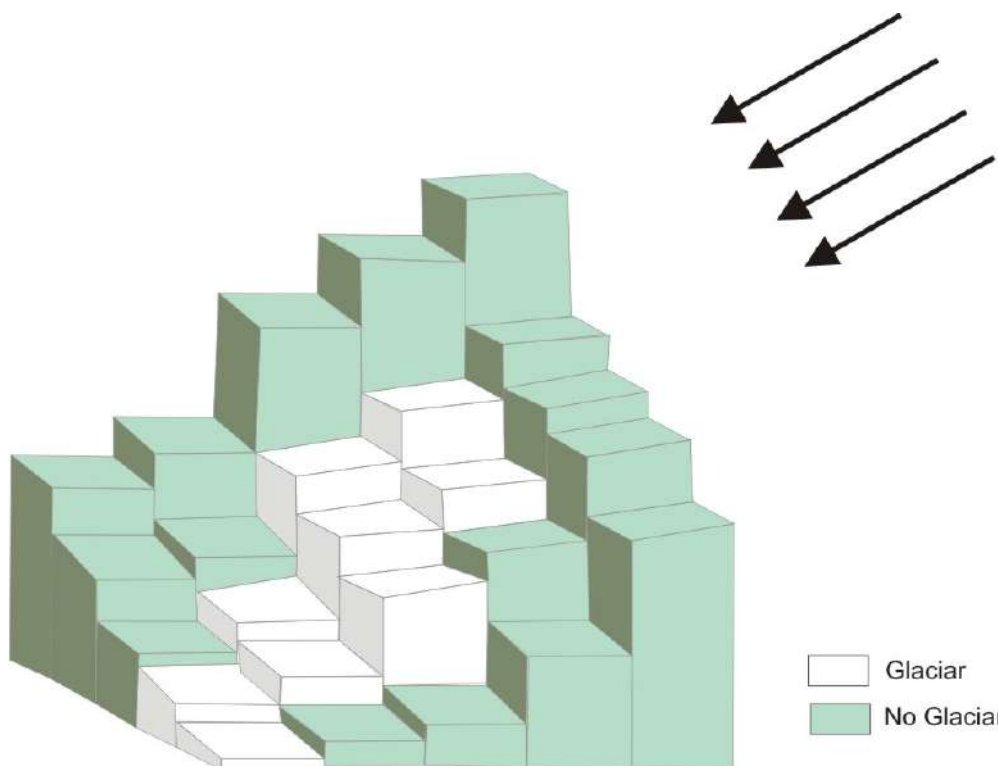


Figura 7. Vista del cambio del elemento glaciar de área y nieve pixel por pixel (glaciar - color blanco) y píxeles sin cobertura (no glaciar - color verde).

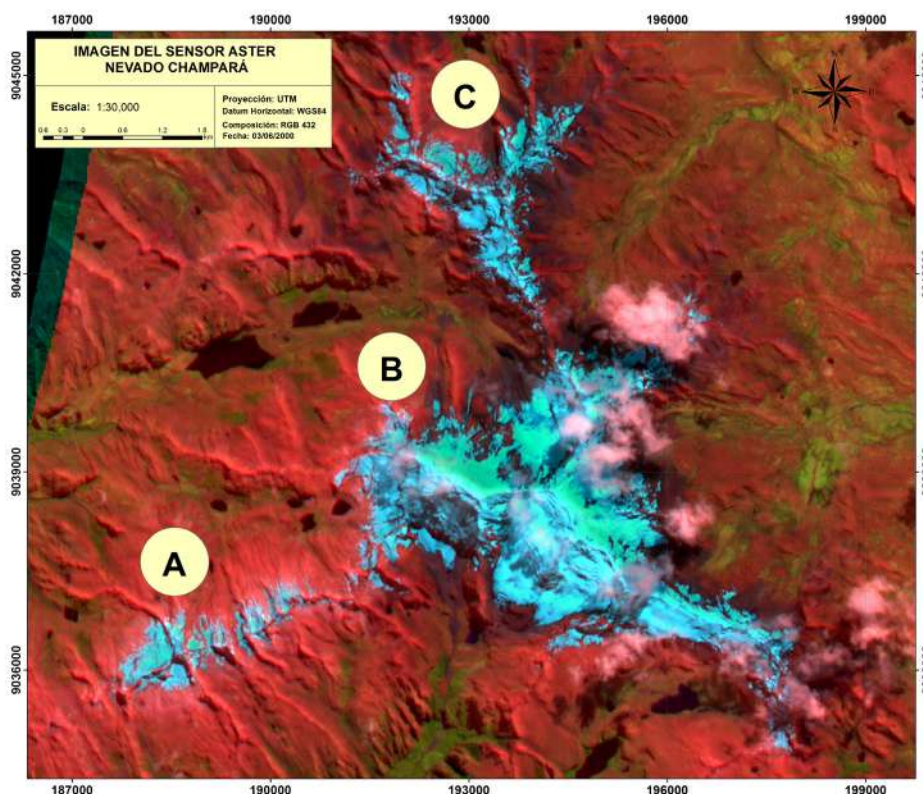


Figura 8. Imagen ASTER en falso color del nevado Champará, RGB: 432, y con un realce (Enhance Square Root). Esta imagen es del 26-05-00 y se identifican los sectores A, B, C.

un vector en formato (*.evf), mediante el software ENVI 4.7, este vector aplicado sobre el MED permite generar un vector-máscara, aislando la parte que corresponde al nevado Champará de los alrededores. Este vector-máscara es aplicado para todos los MEDs (2003-2010), lo que permite alinear adecuadamente los píxeles involucrados y exportar en formato ASCII (*.TXT).

Resultados

Para cuantificar el cambio de área y volumen glaciar, se consideró tres sectores denominados A, B y C (Figura 8), donde los sectores A y C se encuentran dentro de la clasificación de ($< 1 \text{ km}^2$) según Ames (1989) y UGRH (2010).

Método del Mapeo y Delimitación de Cobertura Glaciar

Para la delimitación de la superficie del nevado Champará, se realiza un enmascaramiento del área glaciar mediante el método del NDSI, seguidamente se asigna de forma automática la edición vectorial (Density Slice y Contour Lines) en el software ENVI 4.7, definiendo previamente los umbrales menores a 1.0. El vector generado se exporta al software ArcGIS

10.1, para su edición y el cálculo de área. Para las imágenes ASTER que corresponden a los años 2009 y 2010, solo es posible trabajar en el rango visible (VNIR), debido a que las bandas que corresponden al SWIR presentan problemas técnicos en el sensor (sin datos), lo que dificulta la delimitación automática, generándose errores que superan a un píxel. De acuerdo con la metodología propuesta, la delimitación de imágenes multiespectrales basada en la intensidad de la reflectancia de cada píxel permite distinguir cubiertas de nieve y hielo, aunque en algunos casos es necesario un análisis lógico basado en cuestiones no espectrales de sentido común. De los resultados de la clasificación por el método del NDSI, al sustraer cuerpos de agua (NDWI), y definiendo un umbral ($\text{NDSI} - \text{NDWI} < 1.0$), resultan los polígonos de colores diferentes de la Figura 9, que superpuestos dentro de un entorno SIG, muestran los cambios en área de nieve y hielo glaciar para los años 2000, 2003 y 2010 con evidencias de disminución en lenguas glaciares que se ubican en altitudes por debajo de 4800 msnm del nevado Champará. La Tabla 5 presenta los valores de la estimación de la superficie de nieve y hielo del nevado Champará mediante el NDSI, extrayendo cuerpos de agua (NDWI), para imágenes producto ASTER.

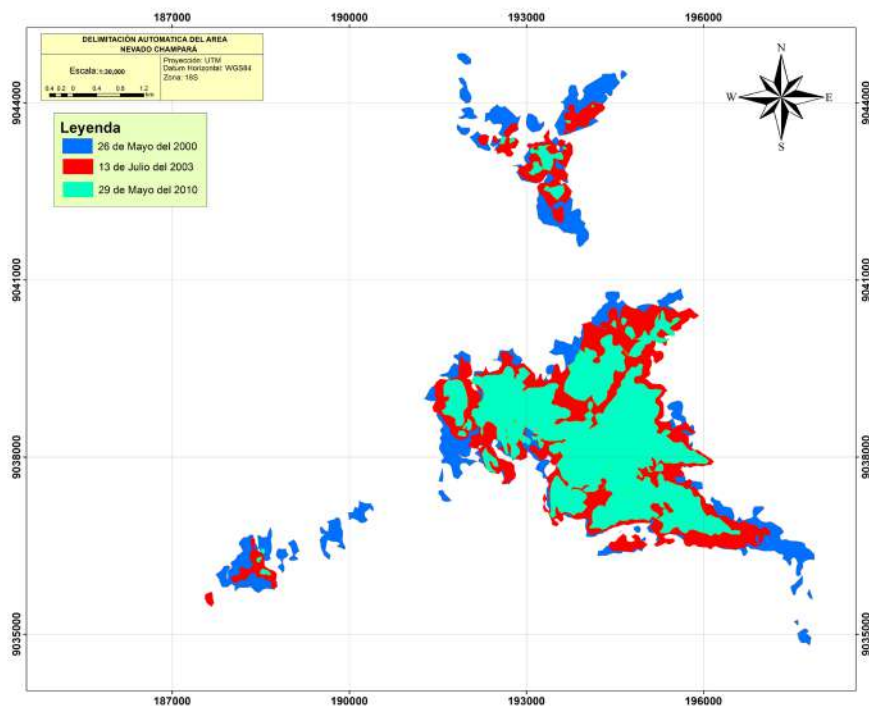


Figura 9. Imagen del vector polígono de área glaciar nieve y hielo para el nevado Champará, a partir de la delimitación automática de la clasificación del NDSI extrayendo cuerpos de agua glaciar (Tordocillo, 2015).

Para el cálculo de la incertidumbre de las áreas digitalizadas del nevado Champará, se considera el pixel como la mínima lectura del instrumento (sensor), por tanto, se toma la mitad de la dimensión del pixel en metros (Er_p) de la imagen utilizada (TM y ASTER). El error se calcula tomando como base la siguiente ecuación (Vivero Andrade, 2008):

$$\varepsilon = \pm Per * Er_p \tag{7}$$

donde ε es el error de la estimación del área en m^2 , Per es el perímetro del vector-polígono del glaciar en metros, y se procedió a eliminar las áreas contenidas de nieve y hielo, cuyo error de medición es mayor o igual a su área total, obteniéndose errores porcentuales en rangos de 2.5 a 3.6% (Tordocillo, 2015).

En términos de reducción, según la Figura 10, con respecto al año 2000, el área total de nieve y hielo glaciar en el 2001 experimentó una reducción del 16% (2.744 km^2), mientras que en 2003 esta disminuyó en un 30% (5.1763 km^2), en 2006, la reducción resulta ser el 38.6% (6.670 km^2), y entre los años 2007, 2009 y 2010 se observa una reducción aproximada del 50% con respecto al área base. El sector B sigue una tendencia similar con reducción alrededor del 50% de lo que tenía el año 2000.

Estimación del Cambios de Volumen del Nevado Champará

Los modelos de elevación generados a partir de imágenes ASTER corresponden para los años 2003, 2006, 2007, 2009 y 2010. Se toma como referencia la

Tabla 5. Valores de la estimación de la superficie de nieve y hielo del nevado Champará mediante el NDSI, extrayendo cuerpos de agua (NDWI) para imágenes producto ASTER, según sectores indicadas en la Figura 8.

Sector	2000 26-May-2000 (km^2)	2003 13-Jun-2003 (km^2)	2006 21-Jul-2006 (km^2)	2007 25-Ago-2007 (km^2)	2009 29-Jul-2009 (km^2)	2010 29-May-2010 (km^2)
A	1.2999	0.3339	0.5933	0.4801	0.3092	0.1570
C	2.7956	0.9905	0.6799	0.0868	0.6256	0.7359
B	13.1734	10.7673	9.3248	8.2744	7.8252	7.4986
Total ⇒	17.2689	12.0917	10.598	8.8413	8.7600	8.3915

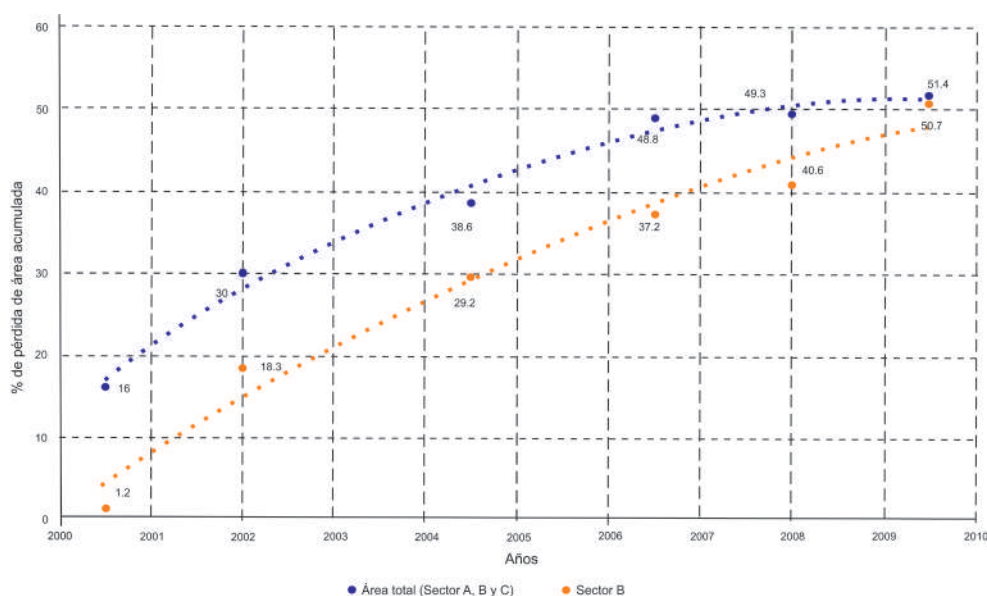


Figura 10. Porcentaje de pérdida de área glaciar: Área total (azul) y del sector B (marrón) del nevado Champará.

imagen del 11 de junio de 2003, porque tiene mayor área glaciar y, en ese sentido, se procedió a delimitar un vector de forma manual con una aproximación cerca de unos píxeles de la línea glaciar, tal como se observa en la Figura 11. Seguidamente, se procedió a generar una máscara teniendo como base dicho vector, y esta máscara, a su vez, nos permitió la extracción del polígono para todos los MED utilizados.

A partir de la metodología propuesta, se obtuvieron modelos de elevación digital basados en imágenes ASTER. En la Figura 12, los círculos señaladas muestran visualmente, según el color, la diferencia en altura muy significativa entre la imagen izquierda y la derecha. Esta diferencia conduce a la distorsión

en los cálculos con una mayor incertidumbre que lo esperado (Abermann et al., 2010; Gousie, 1998; Käab, 2008; Mark y Seltzer, 2005; Rivera y Cassasa, 1999).

Siguiendo la propuesta Mark y Seltzer (2005) para la diferencia de dos modelos de elevación digital y sumando pixel a pixel todos los píxeles del área glaciar en estudio, se observa que, según la Tabla 6a, la variación de volumen glaciar en el periodo 2006-2003 (3 años) es de -0.2218 km^3 , para el periodo 2009-2007 (2 años) es de -0.2384 km^3 , para el periodo 2007-2006 (1 año) es -0.071 km^3 y para el periodo 2010-2009 (1 año) es -0.0853 km^3 con variaciones muy próximas, siendo los cambios

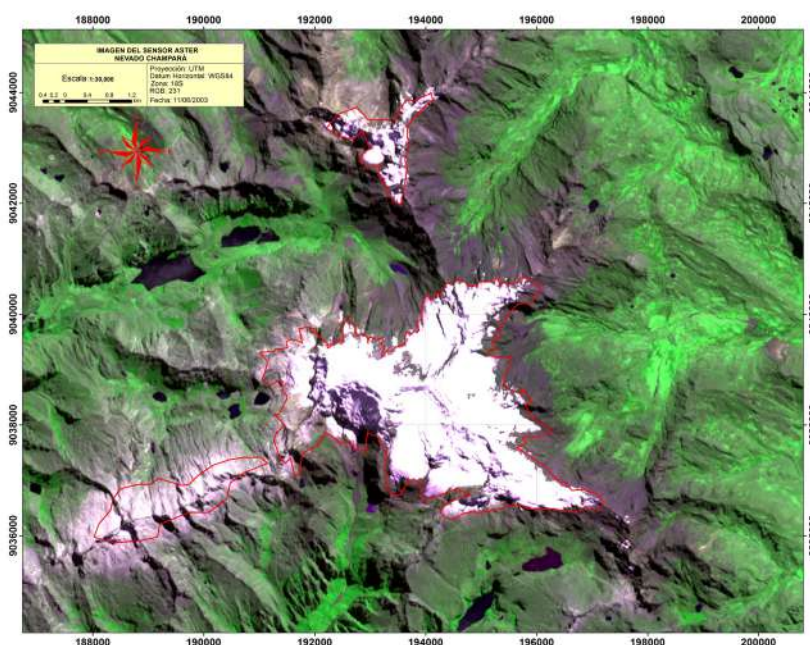


Figura 11. Imagen ASTER que corresponde al 11 de junio de 2003, combinación falso color RGB 231 y límites del área que se ha tomado en cuenta para la estimación del cambio del volumen glaciar.

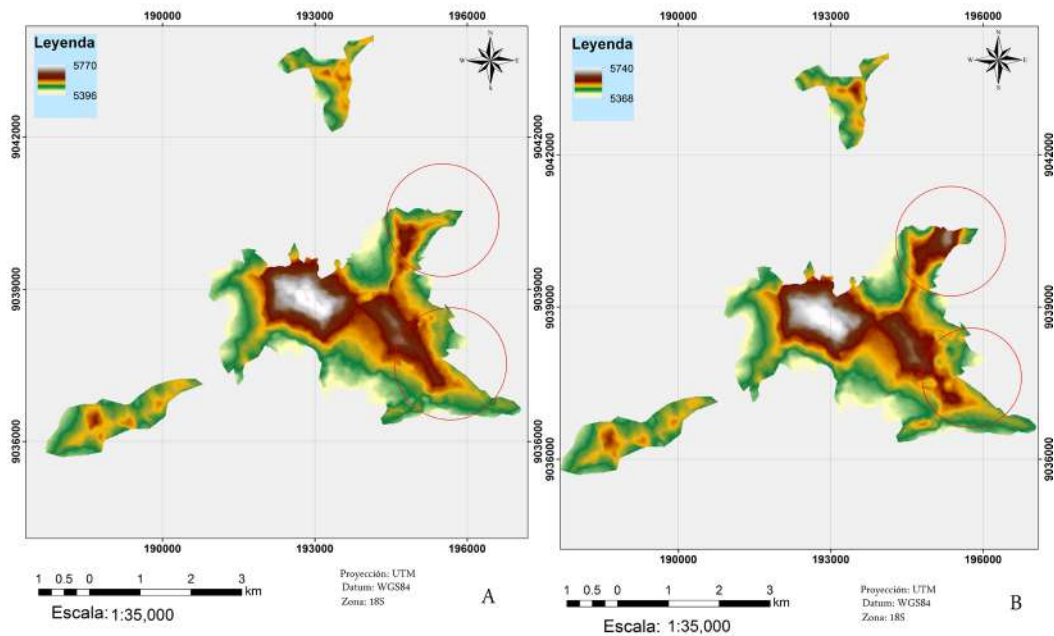


Figura 12. Modelo de Elevación Digital a partir de imagen ASTER del 11 de junio 2003 (izquierda) y del 29 de mayo 2010 (derecha). Los círculos en rojo indican la diferencia de altitud pronunciada que llevan a la distorsión.

Tabla 6. Cambio de volumen a partir de la diferencia entre dos modelos de elevación digital: (a) Sumando todos los pixeles del área en estudio, y (b) considerando solamente 73,035 pixeles del total de 74,563 pixeles.

Periodo (años)	(a)		(b)		
	Variación de volumen $\Delta V(km^3)$	Tasa del cambio de volumen $\Delta V(km^3/año)$	Variación de volumen $\Delta V(km^3)$	Tasa del cambio de volumen $\Delta V(km^3/año)$	Variación de altura $\Delta h(m)$ según Abermann et al. (2009).
2006-2003	-0.2218	-0.0713	-0.0743	-0.02387	-6.5
2007-2006	-0.071	-0.0648	-0.0268	-0.02936	-2.8
2009-2007	-0.2384	-0.1236	-0.0285	-0.05106	-3.2
2010-2009	-0.0853	-0.1024	-0.0233	-0.02797	-2.7

episódicos de volumen glaciar para el periodo 2000-2010 con variaciones constantes.

Para las Tablas 6b y 7, se consideraron solamente las variaciones de altitud que no superan un rango de $-30 m \leq \text{diferencia (DEM)} \leq 30 m$. Con esta aproximación, se reduce el error menor al $\pm 5\%$. Esta consideración fue utilizada en trabajos previos de cambio de volumen glaciar en Abermann et al., (2009); Hirano, Welch y Lang (2003). Para el área que comprende el cálculo de volumen del nevado Champará, es de 74,563 pixeles, la restricción propuesta permitió eliminar alrededor de 1,528 pixeles que equivale a un área de 0.3438 km² (no cuantificado).

La desventaja de hacer uso de los modelos de elevación digital para estimar los cambios de elevación del glaciar se debe principalmente al ruido aleatorio por los errores en el MED. Aplicando la ley

de propagación de errores de acuerdo a Etzelmüller (2000) y el error de la diferencia de MED ($\epsilon_{\Delta Z}$), es la raíz cuadrada de la suma al cuadrado del error de cada modelo de elevación individual (ϵ_{DEM1} y ϵ_{DEM2}) (Etzelmüller, 2000).

$$\epsilon_{\Delta Z} = \pm \sqrt{\epsilon_{DEM1}^2 + \epsilon_{DEM2}^2} \quad (8)$$

La correlación de los modelos de elevación es alrededor de 0.9879, y se asume con incertidumbre alrededor del $\pm 10\%$ (Abermann et al., 2010).

Considerando el comportamiento de la distribución de cambio de altitud en el glaciar y analizado el histograma, se encontró que hay pixeles con variaciones considerables, probablemente debido a los errores antes señalados. En el análisis, se consideró no incluir un cierto número de pixeles del glaciar por anomalías antes expuestas.

Tabla 7. Cambio de volumen a partir de dos modelos de elevación digital, considerando solamente 73,035 píxeles del total de 74,563.

Diferencia de años	Nº días	$\Delta V(\text{km}^3)$	Tasa de cambio de $\Delta V(\text{km}^3/\text{año})$
2006-2003	1136	-0.0743	-0.0238
2007-2003	1536	-0.0812	-0.0192
2009-2003	2240	-0.0976	-0.0159
2010-2003	2544	-0.1241	-0.0178

Según Cerna Arellan (2012).

MED	$\Delta V(\text{km}^3)$ (2010-2000)	Promedio anual $\Delta V(\text{km}^3/\text{año})$
MED	-0.358	-0.0358
IGN		
GMED	-0.221	-0.0221
ASTER		

Discusión

La Cordillera Blanca es el escenario más grande de reserva de agua, según el inventario de glaciares de la Cordillera Blanca realizada por UGRH (2010). Según UGRH, el área calculada para el nevado Champará utilizando una sola imagen ASTER LIB de 2006, con valores de reflectancia aparente, es de 9.77 km². Según Cerna Arellan (2012) del LABTEL-UNMSM, se consiguió un área aproximada de 6.553 km² con imágenes del sensor TM. En este trabajo con una imagen ASTER, del mismo año 2006 para el sector B (véase Figura 8) es de 9.37 km². Entre este trabajo y el de UGRH, la diferencia es de 0.4 km². Esta discrepancia se encuentra dentro de los márgenes del error permitido y se deduce que las imágenes del sensor ASTER son adecuadas para estudios de glaciares comparables en extensión al nevado Champará. Los resultados se complementan

en versiones preliminares de Tordocillo y Rojas (2012, 2013).

En la Figura 13, la gráfica muestra la disminución de la cobertura glaciar en el tiempo y también se observa la variación del área glaciar episódica en el periodo 2000-2010, con un patrón que podría ser ajustado a una función exponencial tanto para el sector B (color verde) como para el área total (color azul) del nevado Champará. Se estima el tiempo “t” (en años) para la reducción del área glaciar (menor a 1 km²), según la siguiente expresión:

$$1 \text{ km}^2 \leq 17.014 e^{-0.069t} \text{ km}^2$$

$$\ln\left(\frac{1}{17.014}\right) \leq -0.069t$$

$$\frac{2.8340}{0.069} \leq t$$

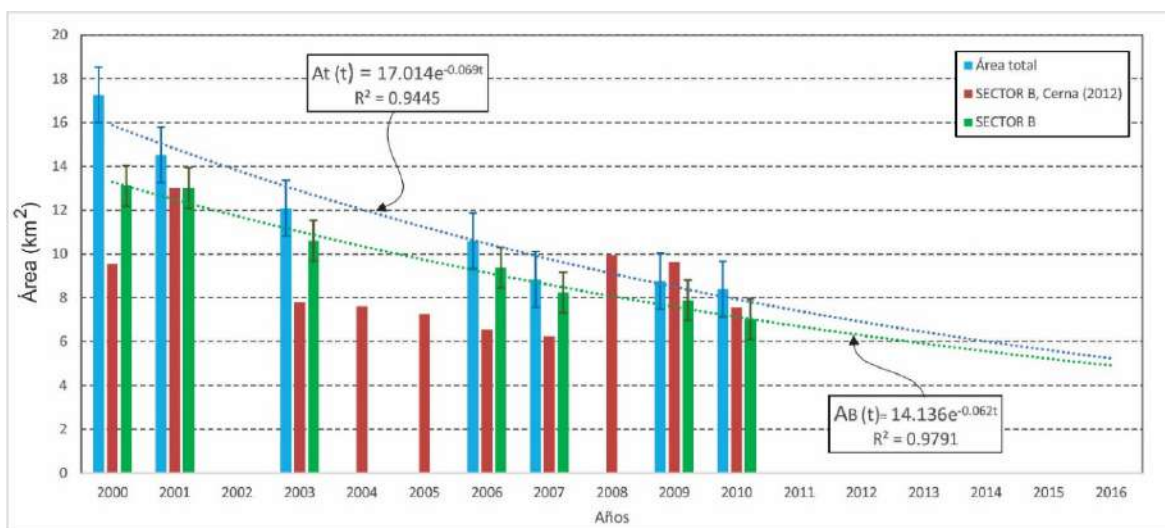


Figura 13. La tendencia temporal de la reducción del área de nieve y hielo glaciar a partir del sensor ASTER: Área total (barra celeste), área Sector B (barra verde) y área calculada por Cerna Arellan (2012) con datos de imágenes TM LANDSAT 5 (barra marrón).

donde $t \geq 41.07$ años. Para el “sector B”, según el ajuste exponencial la reducción del área glaciar (menor a 1 km²) alcanzaría en $t \geq 42.72$ años.

La razón de cambio (o tasa de cambio) de la variación episódica de volumen para el periodo 2003-2010, a partir de modelos de elevación digital (Figura 14a). La pendiente del ajuste lineal es de -0.085 km³/año (con R² = 0.9303), Comparando las variaciones de volumen en los periodos 2001-2009 y 2001-2010, con datos obtenidos por Cerna (2012), a partir de puntos máximos y mínimos, número de píxeles, área del píxel (900 m²) expresado en una curva hipsométrica normalizada Cerna Arellan (2012), dichos resultados difieren muy poco con lo obtenido a partir de la diferencia de píxel a píxel de los modelos de elevación digital. Para la Figura 14b, que relaciona variación de volumen en el periodo 2003-2010 y a partir de la pendiente de la recta de ajuste, se obtiene la tasa de cambio de -0.0159 km³/año con (R² = 0.9954). A partir de los datos de la variación de volumen, se calculó con la ecuación 5 para la variación de espesor medio anual (Δh) (Abermann

et al., 2009). Estimando la variación de altitud episódica según el periodo y comparado mediante la formulación empírica de Bahr, Meier y Peckham (1997) calculada en Tordocillo (2015), con resultados similares en promedio de cambios episódicos de altitud de -1.76 m/año y -1.27 m/año respectivamente (Figura 15). Estos resultados de disminución de altitud acumulada para el periodo 2003-2010 tienden a un comportamiento lineal de aumento negativo de hielo y nieve glaciar del nevado Champará.

Se observa de las Figuras 14 y 15 que la pérdida de volumen y espesor glaciar obedecen a una razón de cambio acelerado con tendencia lineal. Este comportamiento se debe principalmente a los cambios dinámicos, tanto en el área y el espesor, que evolucionan de forma similar en el nevado Champará, teniendo como base el principal factor por adelgazamiento en las capas glaciares con ritmo de cambio constante para el periodo 2003-2010, como sucede en otros estudios de glaciares como Racoviteanu et al. (2007) y Peduzzi, Herold y Silverio (2010).

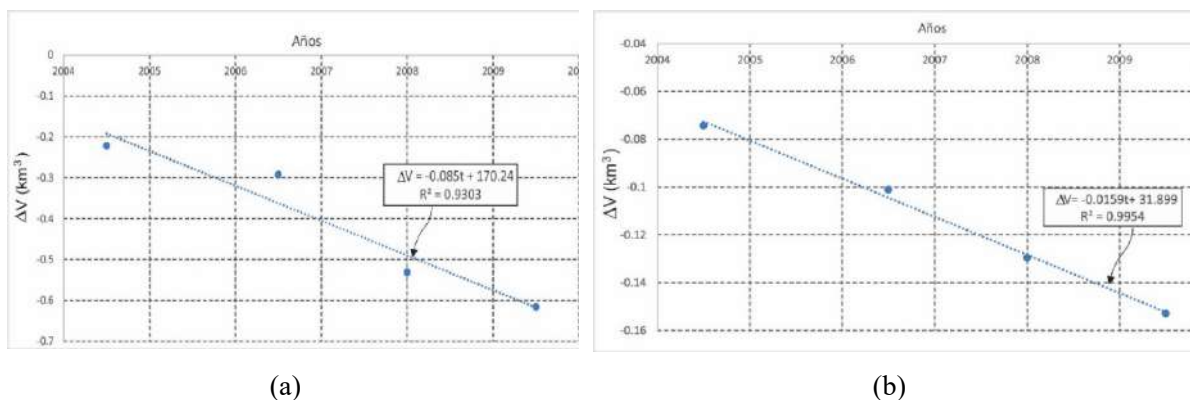


Figura 14. Variación del volumen glaciar: (a) Todos los píxeles dentro del polígono del cálculo de variación de volumen, y (b) considerando solo 73,035 píxeles de la totalidad de 74,563 píxeles.

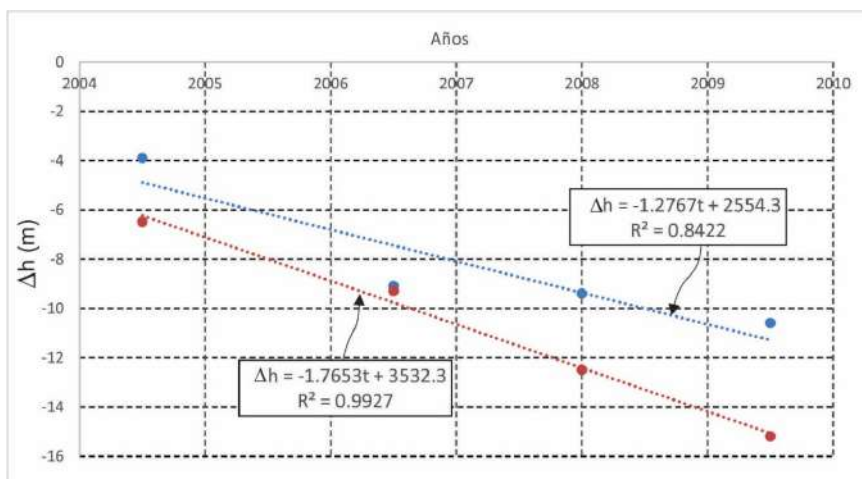


Figura 15. Variación de altura promedio (Δh) a partir del área glaciar y de la variación de volumen episódica (73,035 píxeles del total de 74,563). Según Bahr, Meier y Peckham (1997) (celeste) y según Abermann et al. (2009) (marrón).

Conclusiones

Se han estimado de forma simple los cambios de área y volumen glaciar según la evolución temporal del nevado Champará mediante el procesamiento de las imágenes ASTER y el uso de los modelos de elevación digital.

Para la desglaciación episódica en el periodo 2000-2010, se ha observado una disminución del área glaciar de aproximadamente el 50% en relación al año 2000 y la tendencia del ritmo de cambio episódico es de una disminución exponencial. Con las mismas condiciones climáticas, el área total se reduciría a menos de 1 km² en aproximadamente 41.7 años y para el sector B (Figura 7) en 42.7 años.

La tasa de variación de volumen glaciar del nevado Champará a partir de la diferencia de modelos de elevación digital en el periodo 2003-2010 se ajusta a un comportamiento lineal con pendiente de ajuste -0.085 km³/año, para todos los píxeles del MED. Mientras que con la restricción (eliminando píxeles anómalos) es de -0.0159 km³/año, con coeficiente de correlación de R²=0.9303 y R²=0.9954, respectivamente.

La estimación de la variación de altitud episódica acumulada del glaciar para el periodo 2003-2010, calculada por Tordocillo (2015) utilizando la fórmula empírica de Bahr, Meier y Peckham (1997), sigue un comportamiento lineal de pendiente negativa y, comparado con los resultados de la variación del espesor glaciar, en promedio son similares (Figura 15). Concluyéndose que los resultados de disminución de altitud acumulada para el periodo 2003-2010 tienden a un comportamiento lineal de aumento negativo de hielo y nieve glaciar del nevado Champará.

Los modelos de elevación digital generados a partir de las imágenes ASTER, presentan dificultades en zonas marcadas con círculos en rojo (Figura 12), por lo que se realiza una restricción para no ser contabilizados los píxeles anómalos, siendo en promedio el área no cuantificada de 0.3438 km². Con esta consideración, los resultados de la estimación de la variación de volumen del nevado Champará son coherentes, dado que se eliminan alteraciones debido a sombras, presencia de nubes y alta reflectividad de la nieve fresca.

Aplicar esta metodología es promisorio para glaciares de poca extensión, son necesarios los

estudios y registros previos de campo (balance de masa y datos climáticos). El análisis hecho a partir de imágenes satelitales puede tener mejoras cuanto mayor sea la resolución de las imágenes y permitirá que la tasa de retroceso glaciar se ajuste a comportamientos reales de los cambios de área y variación de volumen a través del tiempo.

Referencias

- Abdalati, W., Krabill, W., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J.,... Koerner, R. (2004). Elevation changes of ice caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Journal of Geophysical Research*, 109, F04007, 1-11. doi:10.1029/2003JF000045
- Abermann, J., Lambrecht, A., Fischer, A. y Kuhn, M. (2009). Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969-1997-2006). *The Cryosphere*, 3, 205-215. doi:10.5194/tc-3-205-2009
- Abermann, J., Fischer, A., Lambrecht, A. y Geist, T. (2010). On the potential of very high-resolution repeat DEMs in glacial and periglacial environments. *The Cryosphere*, 4, 53-65. doi:10.5194/tc-4-53-2010
- Abrams, M. y Hook, S. (2002). *ASTER User Handbook (Version 1)*. Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory. http://www.fcny.unlp.edu.ar/catedras/geofoto/geo_html/informacion/pdf/ASTER_User_Handbook.pdf
- Abrams, M., Tsu, H., Hulley, G., Iwao, K., Pieri, D., Cudahy, T. y Kargel, J. (2015). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 292-301. doi:10.1016/j.jag.2015.01.013
- Ames, A. (1985). *Estudio de mediciones glaciológicas efectuadas en la Cordillera Blanca por Electro Perú S.A.: Variación y balance de masas de los glaciares y su contribución en el caudal de las cuencas*. Informe realizado durante una estadía de entrenamiento en el Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, C.N.R.S., Grenoble. Publ. N° 457.

- Ames, A. (1989). *Inventario de glaciares del Perú*. Huaraz, Unidad de Glaciología e Hidrología, Hidrandina S. A.
- Bahr, D. B., Meier, M. F. y Peckham, S. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research*, 102(B9), 20355-20362. doi:10.1029/97JB01696
- Bolch, T., Menounos, B. y Wheate, R. (2010). Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote Sensing of Environment*, 114, 127–137. doi:10.1016/j.rse.2009.08.015
- Canty, M. J. (2006). *Image analysis, classification and change detection in remote sensing: With algorithms for ENVI/IDL*. Boca Raton, Florida, CRC Press.
- Cerna Arellan, M. G. (2012). *Cuantificación del cambio de volumen de los glaciares de la Cordillera Blanca utilizando los modelos de elevación digital topográficos y de imágenes ASTER: Nevados Champará y Huascarán*. Tesis de Licenciatura en Física. Lima, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Chen, J. y Ohmura A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. En Lang, H. y Musy, A. (Eds.). *Hydrology in mountainous regions I: Hydrological measurements / The water cycle*, 127-135. IAHS Publ. N° 193. Wallingford, UK, International Association of Hydrological Sciences.
- Cortés, J. (2009). *Evolución espacio-temporal de la superficie del Glaciar Norte del volcán Citlaltépetl utilizando sensores remotos*. Tesis de maestría. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México.
- Durán-Alarcón, C., Gevaert, C. M., Mattar, C., Jiménez-Muñoz, J. C., Pasapera-Gonzales, J. J., Sobrino, J.A.,... Santillán-Portilla, N. (2015). Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*, 59, 19-26. doi:10.1016/j.jsames.2015.01.006
- Etzelmüller, B. (2000). On the quantification of surface changes using grid-based Digital Elevation Models (DEMs). *Transactions in GIS*, 4(2), 129–143.
- Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J. E., Silvestre, E. E., Ginot, P.,... Mendoza, J. (2013). *Glaciares de los Andes tropicales, víctimas del cambio climático*. CAN-PRAA-IRD.
- Gousie, M. B. (1998). *Contours to digital elevation models: Grid-based surface reconstruction methods*. Tesis doctoral. Troy, New York, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Hirano, A., Welch, R. y Lang, H. (2003). Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, 356-370. doi:10.1016/S0924-2716(02)00164-8
- Huggel, C., Kääb, A., Reynolds, J. M. y Heald, A. (2004). Impact-oriented models for potential lake outbursts and ASTER-based application in the Peruvian Andes. En *Turbulenzen in der Geomorphologie*, 129-143. Jahrestagung der Schweizerische Geomorphologische Gesellschaft der SANW, March 28-29, 2003, Erstfeld, Suiza.
- ITT. (2009). *Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide*. Atmospheric Correction Module Version 4.7 (August, 2009 Edition). ITT Visual Information Solutions.
- Kääb, A. (2005). *Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep*. Serie de Geografía Física 48. Zúrich, Instituto Geográfico de la Universidad de Zúrich.
- Kääb, A. (2008). Glacier volume changes using ASTER satellite stereo and ICESat GLAS laser altimetry. A test study on *Edgeøya*, Eastern Svalbard. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10), 2823-2830. doi:10.1109/TGRS.2008.2000627
- Kaser, G. (2001). Glacier-climate interaction at low latitudes. *Journal of Glaciology*, 47(157), 195-204. doi:10.3189/172756501781832296
- Kaser, G. y Georges, C. (1999). On the mass balance of low latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca. *Geografiska Annaler*, 81(4), 643-651.

- Liang, J. y Li, Y. (2008). The glacier extraction based on ASTER data. *2008 International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications*, 3 págs. Beijing. doi:10.1109/EORSA.2008.4620319
- López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés,... Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1-11. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.10.010
- Mark, B. G. y Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20-21), 2265-2280. doi:10.1016/j.quascirev.2005.01.003
- Oñate-Valdivieso, F. y Bosque Sendra, J. (2007). Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. En *Teledetección: Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*, 457-464. [ISBN: 978-987-543-126-3] Buenos Aires, Editorial Martín.
- Pan, B. T., Zhang, G. L., Wang, J., Cao, B., Geng, H. P., Wang, J., Zhang, C. y Ji, Y. P. (2012). Glacier changes from 1966-2009 in the Gongga Mountains, on the south-eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and their climatic forcing. *The Cryosphere*, 6, 1087-1101. doi:10.5194/tc-6-2012
- Peduzzi, P., Herold, C. y Silverio, W. (2010). Assessing high altitude glacier thickness, volume and area changes using field, GIS and remote sensing techniques: The case of Nevado Coropuna (Peru). *The Cryosphere*, 4, 313-323. doi:10.5194/tc-4-313-2010
- Racoviteanu, A. E., Manley, W. F., Arnaud, Y. y Williams, M. W. (2007). Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 110-125. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.036
- Reinhardt, W. y Rentsch, H. (1986). Determination of changes in volume and elevation of glaciers using digital elevation models for the Vernagtferner, Ötztal Alps, Austria. *Annals of Glaciology*, 8, 151-155. doi:10.3189/S0260305500001348
- Rivera, A. y Casassa, G. (1999). Volume changes on Pio XI glacier, Patagonia: 1975-1995. *Global and Planetary Change*, 22, 233-244. doi:10.1016/S0921-8181(99)00040-5
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H.,... Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85-97. doi:10.1016/j.gloplacha.2014.05.005
- Schicker, I. (2006). *Changes in área of Stubai glaciers analysed by means of satellite data for the GLIMS Project*. Master of Science thesis. Leopold-Franzens Universität Innsbruck.
- 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. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012
- Silverio, W. y Jaquet, J.-M. (2009). Prototype land-cover mapping of the Huascarán Biosphere Reserve (Peru) using a digital elevation model, and the NDSI and NDVI indices. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 033516. doi:10.1117/1.3106599
- 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*, 69, 145-162.
- Surazakov, A. B. y Aizen, V. B. (2006). Estimating volume change of mountain glaciers using SRTM and map-based topographic data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10), 2991-2995. doi:10.1109/TGRS.2006.875357
- Teillet, P. M., Guindon, B. y Goodenough, D. G. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 84-106. doi:10.1080/07038992.1982.10855028

- Tordocillo, J. (2015). *Estimación del cambio de volumen del glaciar Champará en la Cordillera Blanca de Ancash a partir de los modelos de elevación digital e imágenes de satélite. Tesis de maestría en física.* Lima, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Tordocillo Puchuc, J. y Rojas Acuña, J. (2012). Estimación del cambio de volumen del glaciar Champará en la Cordillera Blanca de Ancash a partir de datos de satélite en el periodo 2000-2010. *Revista ECIPerú*, 9(1), 41-46.
- Tordocillo Puchuc, J. y Rojas Acuña, J. (2013). Estimación del cambio de volumen del glaciar Champará en la Cordillera Blanca de Ancash a partir de datos de satélite en el periodo 2000-2010. [Versión Preliminar]. *Revista Científica INGETECNO*, 2(1), 9 págs. Lima, Universidad Alas Peruanas. <http://revistas.uap.edu.pe/ojs/index.php/RCI/article/view/208>
- UGRH. (2010). *Inventario de glaciares Cordillera Blanca*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Autoridad Nacional del Agua (ANA). (<http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/ANA/490/ANA0000276.pdf?sequence=1&isAllowed=>)
- Vivero Andrade, S. (2008). *Inventario de glaciares descubiertos de la cuenca del río Copiapó y variaciones recientes en sus frentes.* Informe final de práctica profesional. Santiago, Universidad de Chile.
- Vuille, M. (2013). *Climate change and water resources in the tropical Andes.* Technical Note N° IDB-TN-515. Environmental Safeguards Unit, Inter-American Development Bank.
- Vuille, M., Bradley, R. S. y Keimig, F. (2000). Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D10), 12447–12460. doi:10.1029/2000JD900134
- 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. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.11.003
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79-96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002

Impacto del Cambio Climático en el Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Perú) y en el Recurso Hídrico

Impact of Climate Change on Mount Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Peru) and on Water Resources

Walter Silverio¹ (walter_silverio@hotmail.com)

¹Investigador independiente, Ginebra, Suiza

Resumen

Este artículo presenta un avance histórico en las investigaciones respecto a la cobertura glaciar del nevado Coropuna, la estimación del volumen equivalente de agua (2003-2004) concentrado en el macizo y la incidencia del ENSO (eventos El Niño/La Niña) en las estaciones climáticas cercanas al nevado. Entre los años 1955 (123 km² de cobertura) y 2010 (solamente 47 km²), el nevado Coropuna ha perdido 76 km² (62%) de cobertura glaciar. En el 2003, Coropuna tenía una cobertura glaciar de 57 km², y el espesor promedio del campo de hielo, para el año 2004, fue 93 m. Para 2003-2004, el volumen equivalente de agua fue estimado en 36.9 x 10⁸ m³, y para el 2010, en 30.2 x 10⁸ m³.

Cerca de Coropuna, durante los eventos El Niño de 1982/1983 y 1991/1992, la precipitación fue deficitaria, respectivamente, entre 48% y 100% y entre 70% y 99.7%, mientras que durante el evento de 1997/1998, la precipitación fue excedentaria entre 5% y 51%. Durante el evento La Niña de 1988/1989, la precipitación fue variable, mientras que durante el evento de 1998/2001 fue excedentaria. En la estación climática de Aplao, durante los eventos El Niño de 1982/1983, 1991/1992 y 1997/1998, la variación de la temperatura (mínima y máxima) fue positiva. Durante La Niña de 1988/1989, la variación de la temperatura máxima fue positiva y la de la temperatura mínima fue negativa, mientras que durante La Niña de 1998/2001, la variación de la temperatura fue positiva. Esto indica que cada evento El Niño/La Niña es particular y los efectos no son necesariamente similares.

Palabras clave: Landsat, Andes, ENSO, cambio climático, glaciología, volumen equivalente de agua

Abstract

This article presents a historical advance in investigations regarding the glacier coverage of

Nevado Coropuna, the estimation of the equivalent volume of water (2003-2004) concentrated in the massif, and the incidence of ENSO (El Niño/La Niña events) in the weather stations near the mountain. Between the years 1955 (123 km² of coverage) and 2010 (only 47 km²), Coropuna has lost 76 km² (62%) of glacial coverage. In 2003, Coropuna had a glacier coverage of 57 km², and the average thickness of the ice field, for the year 2004, was 93 m. For 2003-2004, the equivalent volume of water was estimated at 36.9 x 10⁸ m³, and for 2010, at 30.2 x 10⁸ m³.

Near Coropuna, during the El Niño events of 1982/1983 and 1991/1992, rainfall was deficient, respectively, between 48% and 100% and between 70% and 99.7%, while during the event of 1997/1998, there was a rainfall surplus of between 5% and 51%. During the La Niña event of 1988/1989, rainfall was variable, while during the 1998/2001 event, there was a surplus. At the Aplao weather station, during the El Niño events of 1982/1983, 1991/1992 1997/1998, the variation in temperature (minimum and maximum) was positive. During La Niña of 1988/1989, variation in the maximum temperature was positive and that of the minimum temperature was negative, while during La Niña of 1998/2001, the temperature variation was positive. This indicates that each El Niño/La Niña event is particular and the effects are not necessarily similar.

Keywords: Landsat, Andes, ENSO, climate change, glaciology, equivalent volume of water

Introducción

Bajo el título de “Impacto del cambio climático en el nevado Coropuna y la amenaza en el abastecimiento del agua”, se realizó el proyecto Coropuna entre 2004 y 2005. El proyecto fue financiado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo (GTZ), institución que tenía un proyecto en Arequipa denominado “Cooperación Peruano Alemana para la Seguridad Alimentaria” (COPASA).

En la región de Arequipa, la gran mayoría de los habitantes se abastece de las aguas del Nevado Coropuna, siendo este líquido elemento utilizado en la agricultura, la ganadería y el consumo humano. Por tal razón, COPASA quería conocer el volumen de agua almacenada en la montaña. Para tal efecto, se necesitaba estimar la cobertura glaciaria y el espesor del hielo.

Para estimar la cobertura glaciaria, se utilizaron las imágenes de los satélites Landsat 2 MSS, 5 MSS y 5 TM. La cobertura obtenida con la imagen del 4 de setiembre 2003 (Figura 1) sirvió para la estimación del volumen equivalente de agua, y el resto sirvió para realizar un avance histórico de la cobertura glaciaria del macizo.

Para conocer el espesor de hielo, en agosto del 2004, se realizaron trabajos geofísicos en condiciones extremas, a más de 6000 m de altitud, logrando un perfil de más de 10 km. El equipo científico del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estaba compuesto por Pascal Peduzzi y Christian Herold, y el equipo de logística incluía dos guías de alta montaña, dos aspirantes a guía, siete porteadores, un cocinero (todos miembros de Zárate Expedition) y cuatro choferes de COPASA (Figura 2).

El Nevado Coropuna representa la reserva hídrica de agua dulce más importante para la región de Arequipa. Su deshielo alimenta los ríos durante el período de estío y permite superar sin dificultades

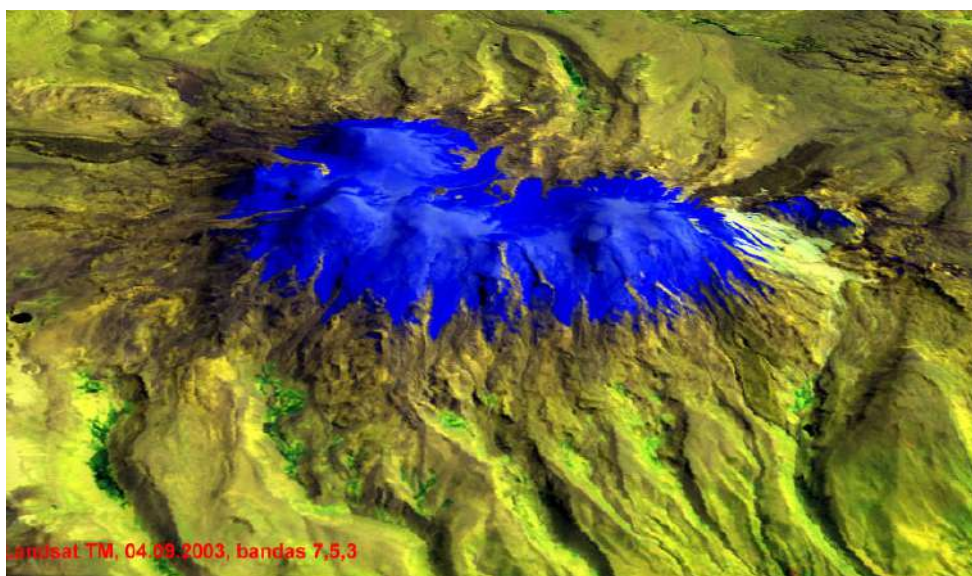


Figura 1. Imagen satelital del 4 de setiembre 2003, superpuesta a un Modelo Numérico de Terreno (MNT, o DEM - Digital Elevation Model). Fuente: Silverio, 2005.



Figura 2. Trabajos geofísicos de campo en el Coropuna en agosto de 2004. Foto: PNUMA.

la falta de precipitación debida a los caprichos climáticos. Según Francou y Wagnon (1998), la desaparición de estos depósitos de agua implicaría la pérdida de un recurso importante para la agricultura, la ganadería y el consumo humano en las ciudades. Así como en los Alpes, los glaciares tropicales son sensibles a los cambios climáticos (Hastenrath y Kruss, 1992). Siguiendo la tendencia general del clima, los glaciares tropicales han retrocedido fuertemente durante las décadas de 1980 y 1990, y en algunas partes han desaparecido por completo (Kaser et al., 2003).

Área de Estudio

El Nevado Coropuna está localizado entre las coordenadas geográficas 15° 39' a 15° 26' latitud sur y 72° 30' a 72° 46' longitud oeste, entre las provincias de Condesuyo y Castilla, departamento de Arequipa (Figura 3). Este macizo forma parte de la Cordillera Ampato y cuenta con varias cumbres con alturas superiores a 6000 msnm. Su punto culminante alcanza 6426 metros de altitud y sus dimensiones aproximadas son 15 km (este-oeste) por 8 km (norte-sur).

Según el primer inventario de glaciares del Perú, realizado a partir de fotos aéreas tomadas en el año 1962, este macizo contaba con 17 glaciares y una superficie de 82.6 km² (Ames et al., 1988). Para el año 2000, la superficie fue estimada en 60.8 km² (Racoviteanu et al., 2007). En los años posteriores, la superficie ha continuado disminuyendo, pasando de 51 km² en 2005 a 47 km² en 2010 (Silverio, 2017).

Parámetros Climáticos alrededor de Coropuna

Precipitación

Según el estudio realizado por Silverio (2008), hasta 2004 existían 15 estaciones climáticas alrededor de Coropuna que medían la precipitación, la temperatura y la descarga. Sin embargo, siete contaban con una serie de datos incompletos. Por tal razón, el análisis mensual y anual de las precipitaciones se ha realizado solo para las ocho mejores estaciones pluviométricas: Andagua, Aplao, Arma, Ayo, Chichas, Orcopampa, Salamanca y Yanaquihua (Figura 4). Las características de las mejores estaciones son resumidas en la Tabla 1.

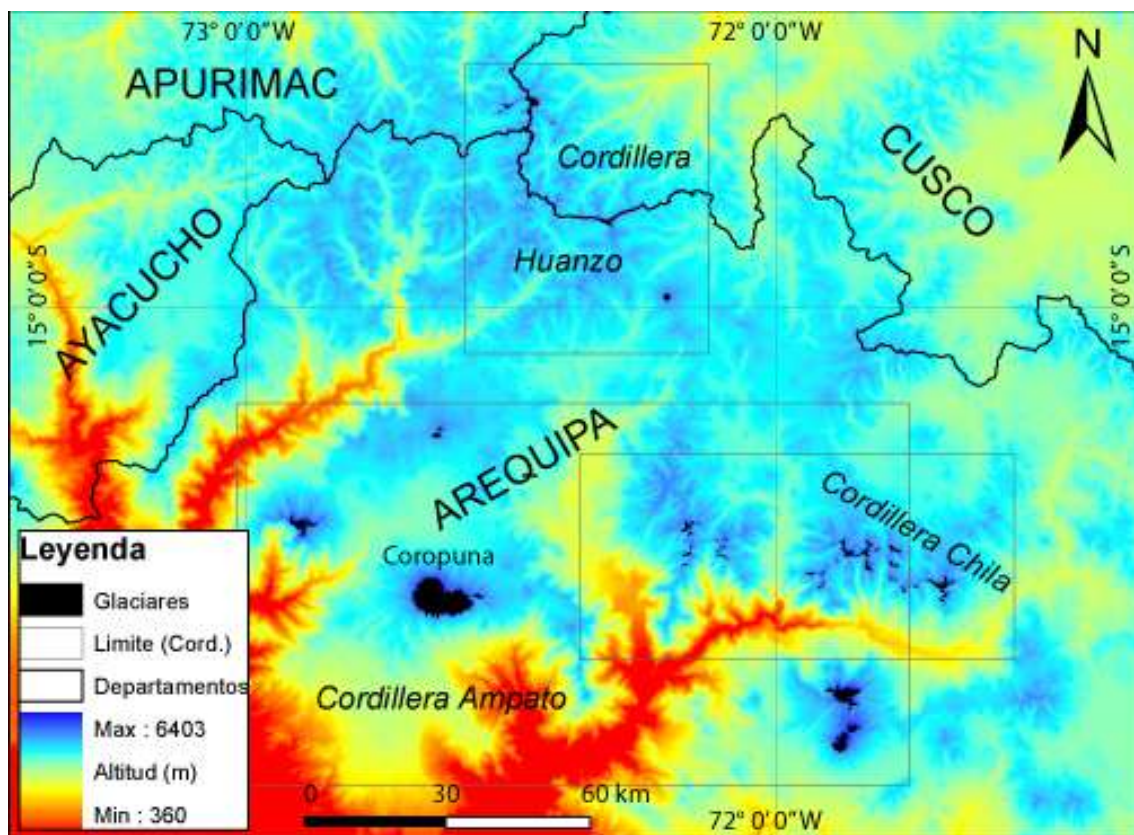


Figura 3. Mapa de localización de Coropuna. Fuente: Silverio, 2017.

Anivel mensual, las precipitaciones son abundantes entre los meses de diciembre y marzo, siendo febrero el mes de las máximas precipitaciones. Los meses de “transición” son abril y octubre. Los meses en que las precipitaciones son pocas o inexistentes son junio, julio y agosto (Figura 5).

El análisis de la precipitación anual y su evolución, por estaciones, ha sido realizado por Silverio (2008) y la Figura 6 muestra las tendencias en las mejores estaciones.

En la estación de Andagua, localizada a 3587 msnm, la precipitación fue variable entre los años 1968 y 1982, con un máximo en 1975 (728 mm). En 1983, se registró el valor mínimo (7 mm). En el período entre 1984 y 2003, igualmente la precipitación fue variable, con un valor mínimo en 1992 (80 mm). Para el período de observación 1968-2003, la tendencia general está en ligera disminución.

Para la estación de Aplao (645 msnm), la precipitación máxima fue durante el año 2002 (21 mm). Durante los años 1979, 1983, 1993 y 2003,

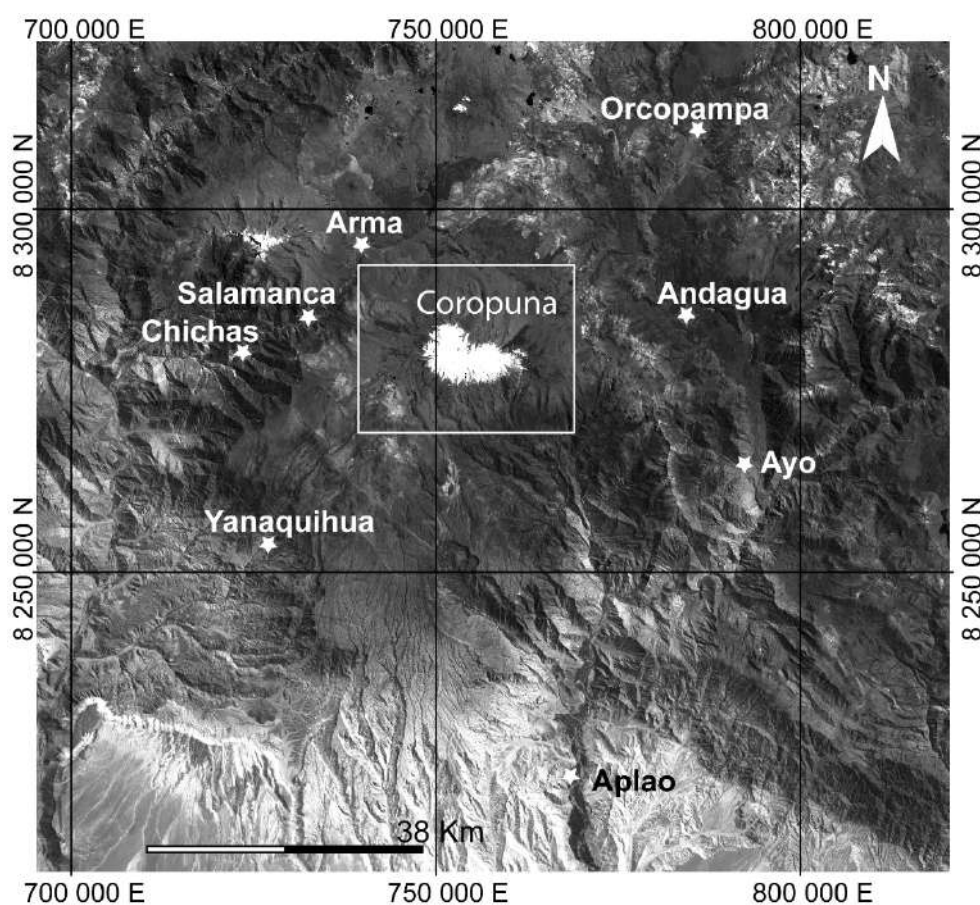


Figura 4. Localización de las estaciones climáticas alrededor de Coropuna. Fuente: Silverio y Jaquet, 2012.

Tabla 1. Dirección y distancias de localización de las mejores estaciones climáticas con respecto a Coropuna.

Estaciones Climáticas	Precipitación Promedio Anual (mm)	Distancia al Coropuna (km)	Dirección	Altitud (msnm)	Años de Observación
Andagua	357.4	30	E	3587	1968 - 2003
Aplao	4.5	60	S-SE	645	1971 - 2003
Arma	318	20	NO	4270	1964 - 1985
Ayo	85.4	42	E-SE	1956	1968 - 2003
Chichas	123.7	30	O	2120	1964 - 2003
Orcopampa	423.2	45	NE	3779	1976 - 2003
Salamanca	349.3	22	O-NO	3203	1964 - 2003
Yanaquihua	143.3	37	SO	3130	1964 - 1997

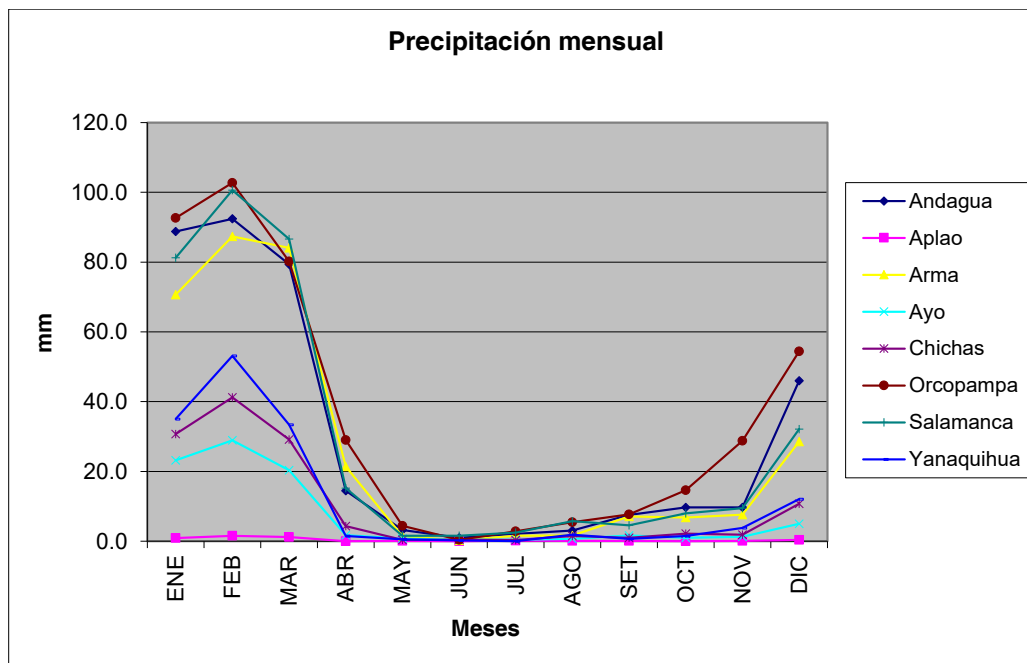


Figura 5. Precipitación mensual en las ocho mejores estaciones climáticas. Fuente: Silverio, 2008.

la precipitación total fue 0 mm. Para el período de observación 1971-2003, la tendencia general es al equilibrio.

En la estación de Arma (4270 msnm), la precipitación máxima cayó durante el año 1967 (647 mm); la mínima fue durante el año 1983 (121 mm). La tendencia general para el período de observación (1964-1985) es al equilibrio.

En la estación de Ayo (1956 msnm), la precipitación máxima fue registrada durante el año 1999 (262 mm); la mínima se registró durante los años 1983 (0 mm) y 1992 (4 mm). Para el período de observación 1968-2003, la tendencia general de las precipitaciones es un leve incremento.

Con respecto a la estación de Chichas (2120 msnm), la precipitación máxima fue registrada durante el año 1999 (253 mm) y la mínima se registró durante 1992 (5 mm). Entre 1964 y 2003, la curva de tendencia indica un ligero incremento.

En la estación de Orcopampa, localizada a 3779 msnm, la precipitación máxima fue registrada durante el año 1984 (660 mm) y la mínima se registró en 1992 (129 mm). Para el período de observación 1976-2003, la tendencia general está en ligero aumento.

Para la estación de Salamanca, localizada a 3203 msnm, la precipitación máxima fue registrada durante el año 1972 (1188 mm) y la mínima se registró en

1992 (13 mm). Para el período de observación 1964-2003, la tendencia general está en ligera disminución.

Finalmente, para la estación de Yanaquihua, localizada a 3130 msnm, la precipitación máxima fue registrada durante el año 1984 (469 mm) y la mínima se registró en 1992 (0.4 mm). Para el período de observación 1964-1997, la tendencia general es al equilibrio.

Según la Figura 6, en las estaciones de Andagua y Salamanca la tendencia general de las precipitaciones está en ligera disminución; en las estaciones de Aplao, Arma y Yanaquihua, la tendencia general está en “equilibrio”; y finalmente, en las estaciones de Ayo, Chichas y Orcopampa, la tendencia general de precipitación está en aumento.

Temperatura

Alrededor de Coropuna, sólo la estación climática de Aplao (645 msnm) presenta una serie continua de datos entre los años 1971 y 2003. Entre los años de observación, el promedio de la temperatura máxima fue 27.5 °C y de la mínima fue 11.9 °C.

Estimación de la Cobertura Glaciar (2003) y el Volumen Equivalente de Agua

Mediante las imágenes satelitales de Landsat 5 TM del 4 setiembre de 2003 y el Índice de Nieve Normalizado (NDSI) (Hall, Riggs y Salomonson,

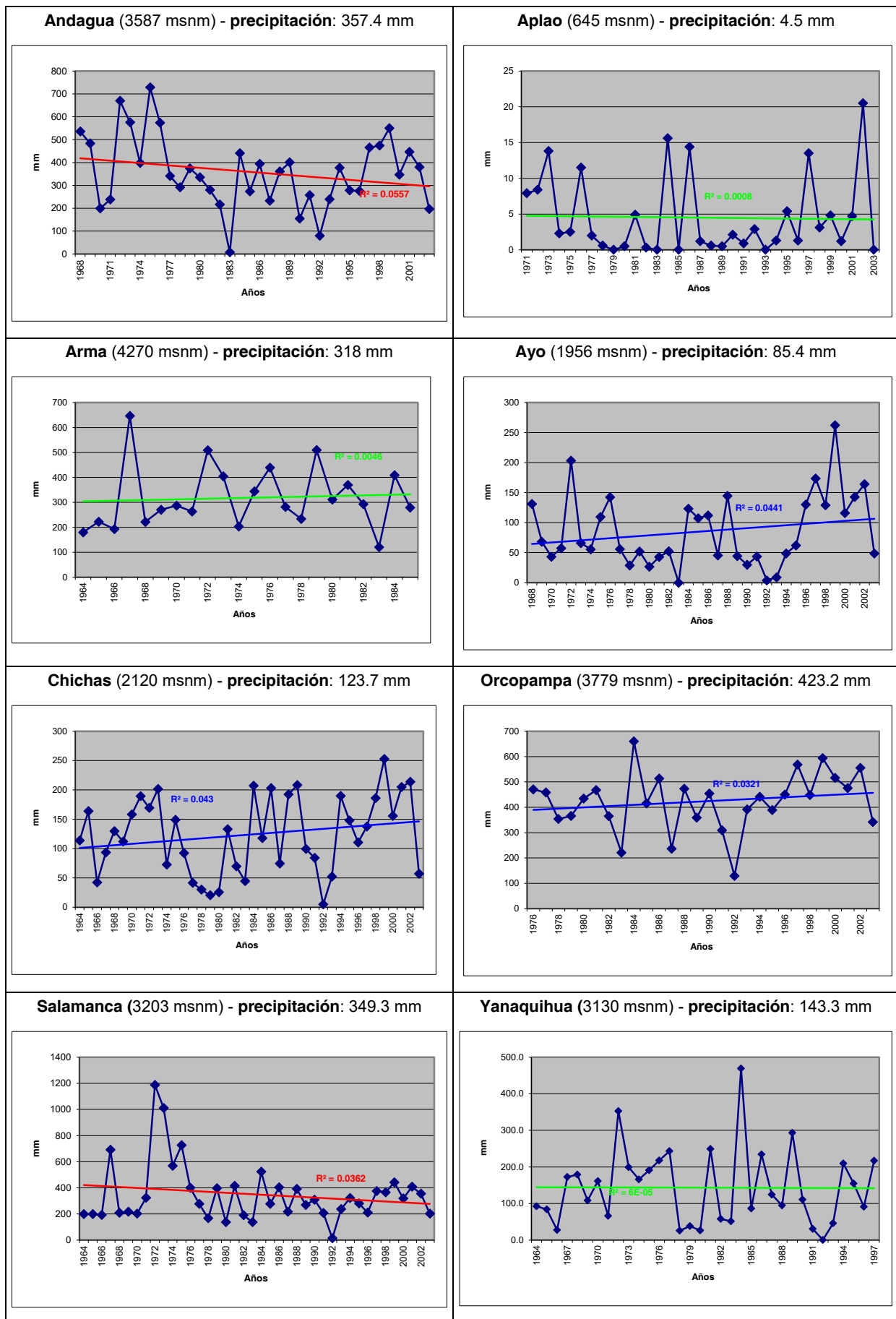


Figura 6. Precipitación anual en las ocho mejores estaciones climáticas (notando la altitud y el promedio anual de precipitación) y sus respectivas curvas de tendencia: aumentación (azul), disminución (rojo) y “equilibrio” (verde). Fuente: Silverio, 2008.

1995), se estimó la cobertura glaciaria de Coropuna. Para la fecha de la toma de la imagen, la cobertura glaciaria fue estimada en 56.7 km² (56.7 x 10⁶ m²) (Silverio y Jaquet, 2012).

En agosto de 2004, se realizaron trabajos geofísicos de campo para estimar el espesor del campo de hielo. A pesar de las condiciones difíciles (altitud, mal tiempo, etc.), el equipo científico del PNUMA, con la ayuda del personal de logística, obtuvo 10.6 km de perfil. Ello permitió obtener el espesor promedio del campo de hielo de 93 m (Figura 7). Combinando la cobertura glaciaria (2003) y el espesor promedio (2004), se estimó el volumen bruto en 52.7 x 10⁸ m³.

Para estimar el volumen equivalente de agua basado en el volumen de hielo almacenado en Coropuna, se necesitaba conocer la densidad. Afortunadamente, dos equipos científicos habían realizado perforaciones en el año 2003. El primer equipo, IRD Great Ice (Francia), obtuvo una densidad de 0.65 gr/cm³ (el promedio de los 20 primeros metros en la garganta del nevado a 6080 msnm). El segundo equipo mixto, compuesto de IRD Great Ice (Francia)

y Thompson (EE.UU.), obtuvo una densidad de 0.61 gr/cm³ (el promedio de los 20 primeros metros en la cumbre del nevado a 6450 msnm).

La densidad promedio entre ambos equipos es 0.63 gr/cm³. Como desconocíamos las profundidades de las perforaciones y las densidades del hielo más allá de los 20 metros, se optó por una densidad aproximada de 0.7 gr/cm³, dado que la densidad aumenta con la profundidad. En consecuencia, considerando una superficie glaciaria de 56.7 x 10⁶ m², un espesor de 93 m, y una densidad de 0.7 gr/cm³, para los años 2003-2004, el volumen equivalente de agua fue estimado en 36.9 x 10⁸ m³.

Evolución de la Cobertura Glaciaria de Coropuna

Un análisis histórico de la cobertura glaciaria de Coropuna ha sido realizado entre los años 1955 y 2003 (Silverio, 2005; Silverio y Jaquet, 2012; Peduzzi, Herold y Silverio, 2010). En ese período, el macizo perdió 54% de cobertura en 48 años (Figura 8). El estudio de la cobertura glaciaria ha sido extendido hasta los años 2005 (51 km²) (Silverio, 2017), 2008 (48.1

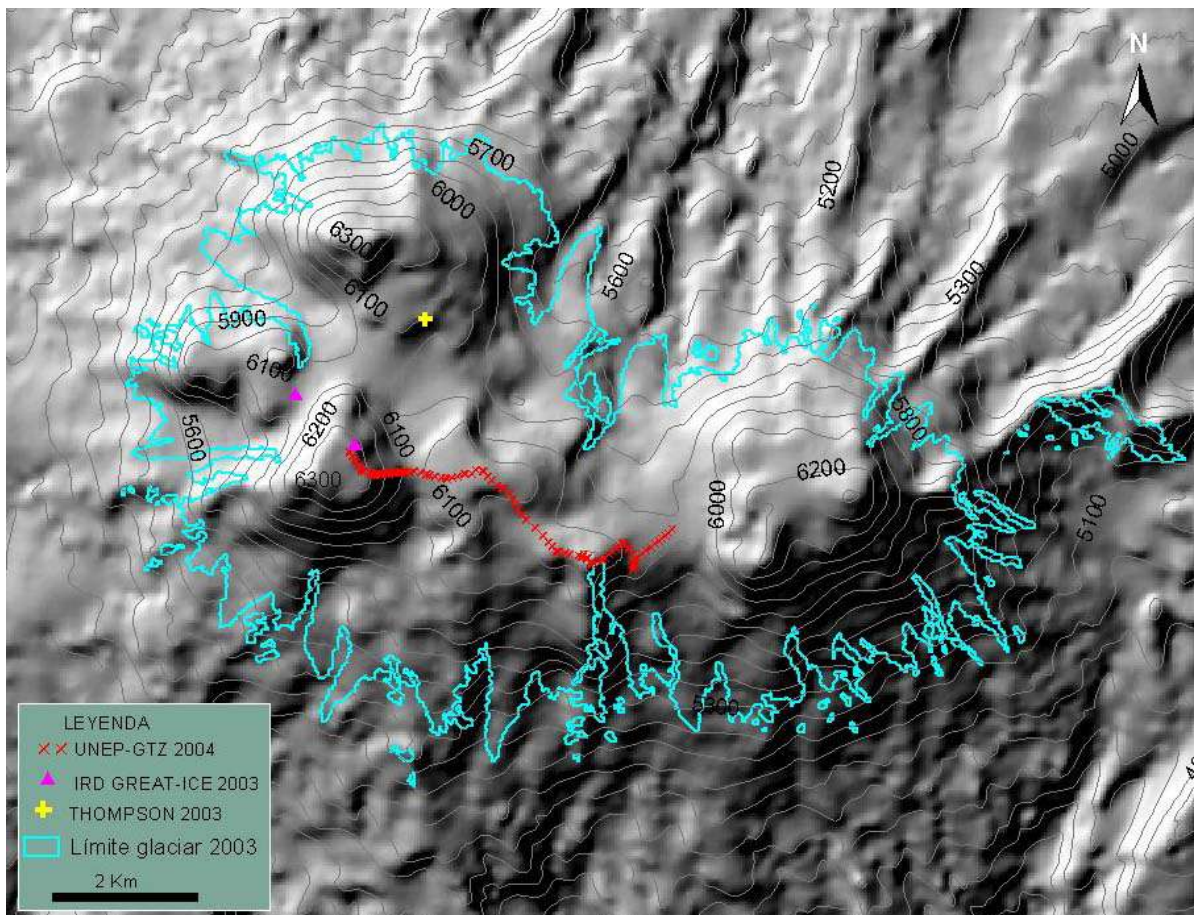


Figura 7. Trayectoria del georradar (UNEP-GTZ 2004) y puntos de las perforaciones de los equipos presentes en el Coropuna (IRD Great Ice 2003, Francia; Thompson 2003, EE.UU.).

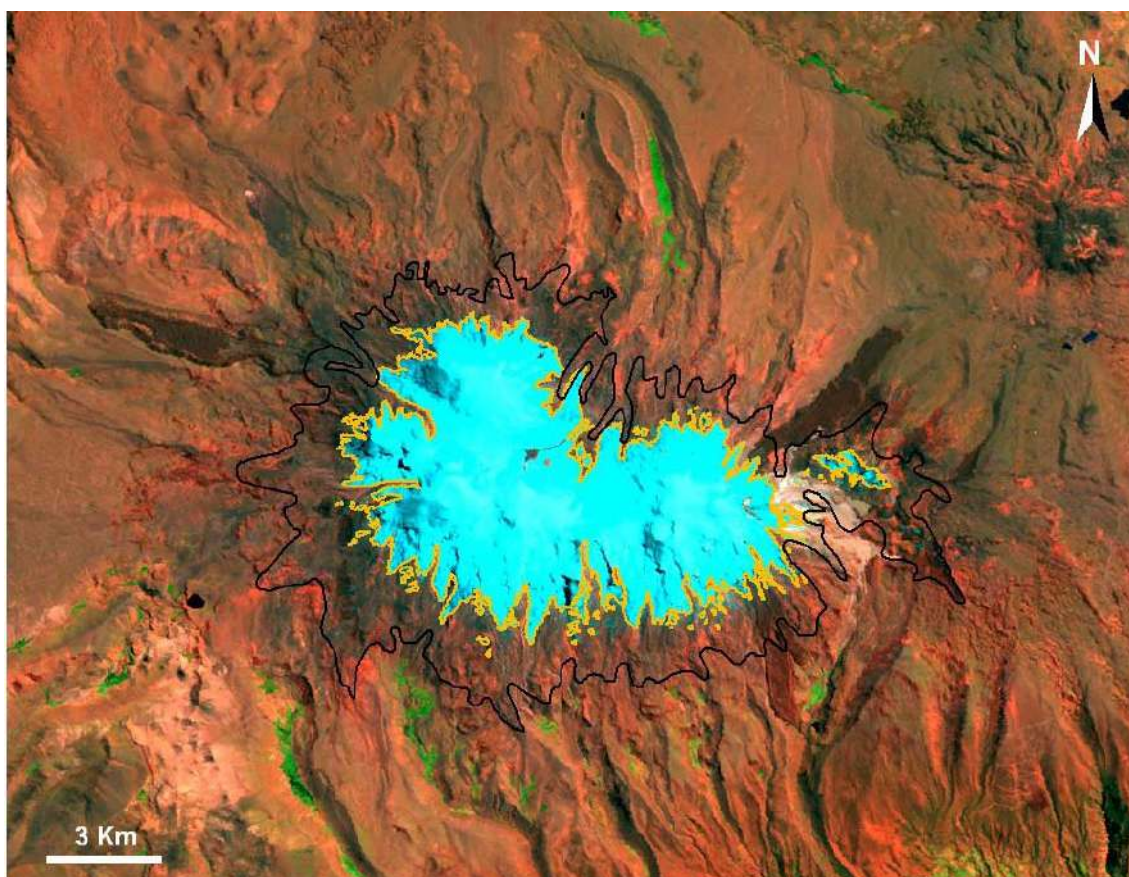


Figura 8. Situación de Coropuna en 1955 (contorno negro) y 2003 (contorno amarillo). Imagen de fondo: Landsat 5 TM del 4 setiembre 2003; composición color bandas 7, 4, 2: RVA. Fuente: Silverio, 2017.

km²) (Peduzzi et al., 2010) y 2010 (47 km²) (Silverio, 2017). Estas cifras muestran que Coropuna continúa con la tendencia a perder su cobertura glaciar (Figura 9).

Si analizamos por períodos, vemos que, entre los años 1955 y 1970, hay una pérdida en la cobertura de 40.4 km², y entre 1970 y 1975, se observa una ganancia de 22.4 km² (Figura 9). Durante la primera mitad de la década de 1970 en la Cordillera Blanca, los glaciares estuvieron en equilibrio y se observó un pequeño avance (Georges, 2004). Esto podría explicar por qué Coropuna experimentó una ganancia en cobertura durante el período 1970-1975. Asimismo, los glaciares de Ecuador, Perú y Bolivia han experimentado el mismo fenómeno desde la Pequeña Edad de Hielo (LIA) (Vuille et al., 2008).

Hay que señalar que la interpretación de fotos aéreas y las imágenes satelitales fue realizada manualmente, lo que puede inducir a cierto error en la cartografía glaciar. En efecto, la cobertura del año 1955 fue determinada a partir de la carta del IGN a escala 1:100,000 con una precisión de 100 metros (Silverio y Jaquet, 2012), la cobertura del año 1970, a partir de fotos aéreas de 1962 (Ames et al., 1988)

y la del año 1975, a partir de las imágenes Landsat 2 MSS, con una resolución de 57 m (Silverio y Jaquet, 2012). Sólo se conoce el error cartográfico para los años 1955, 1975, 1985, 1996 y 2003. Para tales años, respectivamente, la cobertura glaciar fue 123 ± 15 km², 105 ± 16 km², 96 ± 15 km², 64 ± 8 km² y 56 ± 6 km² (Silverio y Jaquet, 2012).

A partir del año 1975, el retroceso glaciar ha sido generalizado en todas las cordilleras nevadas del Perú (Vuille et al., 2008; Silverio, 2017). Coropuna ha sufrido las consecuencias del mismo fenómeno (Albert et al., 2014). El macizo ha seguido perdiendo cobertura, llegando a medir solo 47 km² en el año 2010 (Figura 9). Finalmente, si consideramos la cobertura inicial de 123 km² en 1955, hasta el 2010, Coropuna ha perdido 62% de su área glaciar.

Evolución del Volumen

A nivel de los Andes peruanos, el Coropuna es uno de pocos macizos que cuenta con estudio de volumen. Para realizar este estudio, se ha generado el DEM (Digital Elevation Model o Modelo Digital de Terreno) para 1955, a partir de la carta nacional de IGN al 1:100,000 (Silverio, 2005). El DEM del

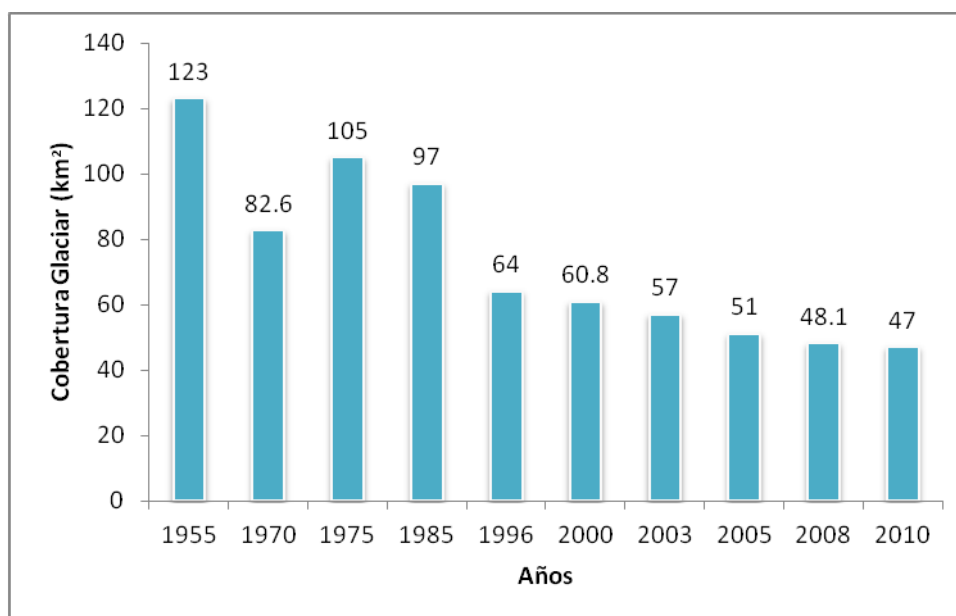


Figura 9. Evolución de la cobertura glaciar de Coropuna entre 1955 y 2010. Fuente: Silverio, 2017.

año 1997 proviene del radar ERS-1 (SAR: Synthetic Aperture Radar) y el de 2002 del satélite ASTER (Peduzzi et al., 2010).

El volumen para 1955 fue estimado en 6.7 km³, siendo el valor teórico o línea base. Para los años 2003-2004, el volumen bruto fue estimado entre 5.2 y 5.5 km³ (Peduzzi et al., 2010). Así, los autores estiman que la pérdida de volumen entre los años 1955 y 2002 fue 1.2 km³, lo que correspondería a 18% del volumen de 1955.

Según Peduzzi et al. (2010), entre los años 1955 al 2002, el casquete glaciar de Coropuna perdió espesor a razón de 0.20 m/año. Entonces, entre los años 2004 y 2010, el espesor del casquete ha disminuido aproximadamente 1.20 m. Esto quiere decir que, para el año 2010, el volumen bruto de hielo almacenado en Coropuna fue 4.3146 km³ (eso es, cobertura de 47 km² por grosor de 0.0918 km), lo que representaba un volumen equivalente de agua de 30.2 x 10⁸ m³. Actualmente, el volumen bruto almacenado en el macizo debe ser menor que las cifras estimadas para año 2010. Los mismos autores señalan que es muy difícil hacer una predicción dado que la precisión y el número de DEM no son suficientes para determinar si la tendencia de la pérdida es lineal o sigue otra tendencia. Los autores estiman que el glaciar de Coropuna puede tener una vida entre 100 y 200 años, a condición de que la tendencia de la pérdida sea lineal y que el cambio climático no acelere el retroceso glaciar. En caso contrario, estaríamos frente al peligro del desabastecimiento de agua para la región.

Hay que recalcar que el retroceso glaciar no significa solamente que el frente glaciar se retira, sino también que hay pérdida en el volumen del glaciar. Hay pocos estudios realizados en el dominio, pues estimar el volumen de un glaciar no es cosa simple, para ello se necesita mucha inversión tanto técnica-científica como logística.

El ENSO (El Niño Southern Oscillation) con Referencia a Coropuna

Variación de la Precipitación durante el ENSO

Para analizar el comportamiento de la precipitación, se han descartado los valores de la estación climática de Aplao, dado que esta estación es la más lejana con respecto al Coropuna (60 km S-SE) y donde llueve muy escasamente (4.5 mm/año) (véase Tabla 1 y Figura 6).

El ENSO tiene dos componentes, la fase caliente es El Niño y la fase fría La Niña (Silverio y Jaquet, 2017; Albert et al., 2014). Alrededor de Coropuna, durante El Niño de 1982/1983, la variación de la precipitación ha sido negativa entre 48% y 100% en todas las estaciones. Durante El Niño de 1991/1992, la precipitación fue negativa entre 70% y 99.7%, y durante El Niño de 1997/1998, la precipitación fue positiva en cinco estaciones (dos estaciones no presentaba datos) entre 5% y 51% (Figura 10 y Tabla 2). Durante La Niña de 1988/1989, la variación de la precipitación fue variable, positiva en tres estaciones y negativa en cuatro estaciones, mientras que durante

La Niña de 1998/2001, la precipitación fue positiva en las cinco estaciones con datos (Figura 10).

Variación de la Temperatura durante el ENSO en la Estación Climática de Aplao

Durante el evento El Niño de 1982/1983, la variación de la temperatura fue positiva: la mínima varió más de 2 °C y la máxima varió 0.5 °C. En el evento de 1991/1992, la temperatura mínima varió 1 °C y la máxima varió cerca de 1 °C. En El Niño de 1997/1998, la temperatura mínima varió 0.5 °C y la máxima varió -2 °C. En contraste, durante el evento La Niña de 1988/1989, la temperatura máxima varió más de 1 °C y la mínima varió -3 °C, mientras que en La Niña de 1998/2001, la variación de la temperatura mínima fue superior a 1 °C y la máxima varió cerca de 0.5 °C (Figura 11).

Discusión

Desde el año 1955, el retroceso glaciar es muy significativo en el Nevado Coropuna. Después de haber ganado 22.4 km² entre los años 1970 y 1975, este macizo no ha dejado de perder cobertura, para finalmente medir 47 km² en 2010 (Figura 9). Entre los años 1955 y 2010, Coropuna ha perdido el 62% de su cobertura glaciar. Según Francou y Pouyaud (2007), el retroceso de los glaciares de los Andes Centrales

está vinculado al cambio climático global, marcado entre la variabilidad del clima y el ENSO. Según Vuille et al. (2008), el ENSO tiene impacto en la temperatura y la precipitación en los Andes tropicales y subtropicales. Estas perturbaciones hidroclimáticas tienen un control sobre el balance de masa de los glaciares andinos (Francou, Ribstein y Pouyaud, 1997).

En la Cordillera Blanca, se ha observado la variabilidad del clima durante el verano andino (junio-agosto). Durante la década de los 80, el tiempo fue muy estable, con solo algunos días con precipitación, localmente conocido como período de “cambio de luna”. Sin embargo, en los años 2013 y 2014, algunos días se presentaron nublados o con caída de nieve hacia los 4200 msnm y con intenso frío hacia los 4000 msnm. Días con precipitación y bajas temperaturas son característicos de la fase neutra y fría (La Niña) del ENSO (Silverio y Jaquet, 2017). Para observar los períodos caliente, neutro y frío, referirse a NOAA (2018).

La fase caliente del ENSO, conocida como El Niño, es asociada con el aumento de la temperatura. Esto depende, por supuesto, de la magnitud del evento (Silverio y Jaquet, 2017). En la estación climática de Querococha, la temperatura media aumenta de 0.2-0.6°C durante el evento El Niño (Silverio, 2007),

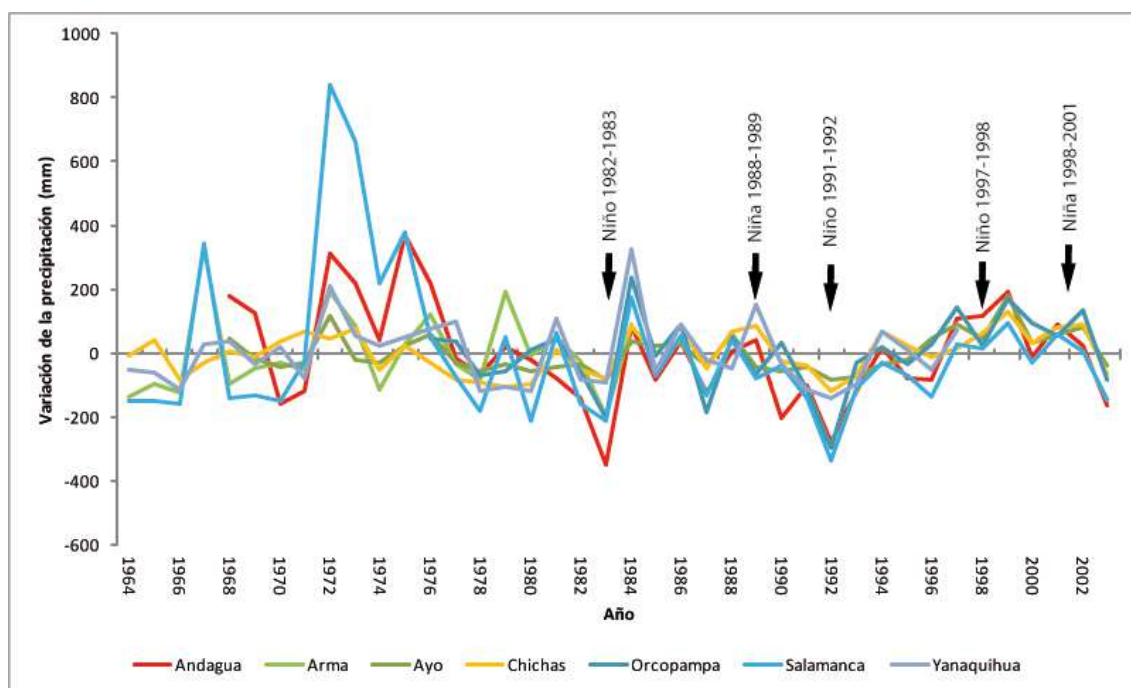


Figura 10. Variación de la precipitación durante los eventos El Niño y La Niña, en las estaciones climáticas alrededor de Coropuna.

Tabla 2. Variación de la precipitación alrededor de Coropuna durante los eventos El Niño. Fuente: Silverio y Jaquet, 2012.

Estación climática	Precipitación promedio anual (mm)	Precipitación durante El Niño de 1992-1983 (mm) / déficit	Precipitación durante El Niño de 1991-1992 (mm) / déficit	Precipitación durante El Niño de 1997-1998 (mm) / variable
Andagua	357.4	7 (-98%)	80 (-78%)	474(+32.5%)
Arma	318	121 (-62%)	/	/
Ayo	85.4	0 (-100%)	4 (-94%)	129 (+51%)
Chichas	123.7	45 (-64%)	5 (-96%)	186 (+50%)
Orcopampa	423.2	221 (-48%)	129 (-70%)	448 (+6%)
Salamanca	349.2	137 (-61%)	13 (-96%)	365 (+5%)
Yanaquihua	143.3	51 (-64%)	0.4 (-99.7%)	/

causando así el desplazamiento hacia arriba de la Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA, por su siglas en inglés) entre 150 y 300 m (Francou, Ribstein y Pouyaud, 1997). En estas condiciones, en la zona de ablación, ya no nieva sino que llueve, acelerando el retroceso glaciar (Silverio y Jaquet, 2017). Las observaciones glaciológicas del glaciar Shallap a 4750 msnm han demostrado que durante los años de presencia del fenómeno El Niño, las precipitaciones son deficitarias, y al contrario son excedentarias durante La Niña (Mausson et al., 2015). En Ecuador y Bolivia, el ENSO tiene un impacto similar en los glaciares con un balance de masa negativo durante El Niño y positivo o cerca al equilibrio durante La Niña (Francou et al., 2003, 2004). Lo mismo ha sido observado en la Cordillera Blanca (Vuille et al., 2008; Kaser et al., 2003). De igual manera, en la Cordillera Blanca se ha observado una fluctuación

en la cobertura glaciar entre los años 1987 y 2016, debido a la sucesión de eventos El Niño y La Niña (Silverio y Jaquet, 2017).

En Coropuna el análisis de la precipitación en las estaciones cercanas al macizo muestra un déficit de precipitación durante El Niño de 1982/1983 (entre 48% y 100%) y de 1991/1992 (entre 70% y 99.7%), mientras que en el evento de 1997/1998, la variación fue positiva (entre 5% y 51%) en las cinco estaciones con medida. Durante el evento La Niña de 1988/1989, la precipitación fue variable y positiva durante 1998/2001 (Figura 10 y Tabla 2).

Anivel de temperatura, durante El Niño 1982/1983, la variación de la temperatura fue positiva: la mínima varió más de 2 °C y la máxima 0.5 °C. En el evento de 1991/1992, la mínima varió 1 °C y la máxima cerca

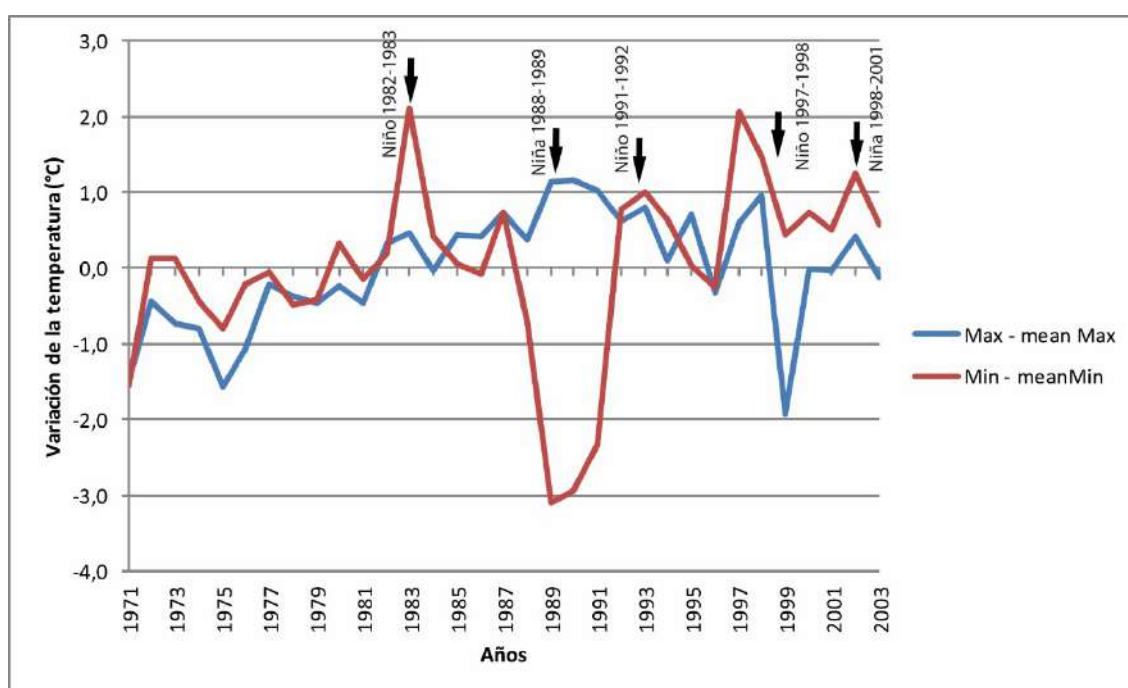


Figura 11. Variación de la temperatura en la estación climática Aplao durante el ENSO: Max – meanMax (temperatura máxima – promedio de las temperaturas máximas) y Min – meanMin (temperatura mínima – promedio de las temperaturas mínimas).

de 1 °C; y en el evento de 1997/1998, la mínima varió 0.5 °C y la máxima varió -2 °C. Durante el evento La Niña de 1988/1989, la temperatura máxima varió más de 1 °C y la mínima varió -3 °C, mientras que en La Niña de 1998/2001, la variación de la temperatura mínima fue superior a 1 °C y la máxima varió cerca de 0.5 °C (Figura 11).

Con las observaciones alrededor de Coropuna, vemos que cada evento El Niño/La Niña es particular y es difícil generalizarlos. Los estudios señalan que, en los últimos decenios, el ENSO es más frecuente e intenso (Cai et al., 2015; Capotondi, Guilyardi y Kirtman, 2013; Wagnon, 2001).

Igualmente, el retroceso significa no solamente el retiro del frente glaciar sino también que el glaciar pierde su masa, y consecuentemente su volumen. Pérdida de volumen significa menor disponibilidad hídrica, lo que representa un peligro para el abastecimiento de agua para la población y para las actividades económicas (Chevallier et al., 2010). El aumento en el consumo de agua y la disminución en las reservas hídricas son causantes de conflictos sociales (Silverio y Jaquet, 2012).

Muchos glaciares son importantes para el sustento de las poblaciones locales e incluso para las tres ciudades capitales, Lima (Perú), La Paz (Bolivia) y Quito (Ecuador), que dependen del líquido elemento para suministrar agua potable para el consumo de la población y para la generación de energía eléctrica que mantiene estas ciudades importantes (Francou y Vincent, 2007).

Para los años 2003-2004, el volumen equivalente de agua almacenada en el Coropuna fue estimado en $36.9 \times 10^8 \text{ m}^3$. Sin embargo, después del 2003 (con área de 57 km^2), el macizo ha seguido perdiendo su cobertura glaciar y, en consecuencia, su masa y volumen. Finalmente, en el año 2010, tenía solamente 47 km^2 de cobertura glaciar y un espesor de 91.8 m. A la fecha, el volumen bruto almacenado en Coropuna debe ser menor que 4.3146 km^3 o $30.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ en volumen equivalente de agua. Esto indica que hay un peligro para el abastecimiento de agua en la región de Arequipa. Por lo tanto, las autoridades deben establecer políticas urgentes de adaptación para así evitar futuros conflictos entre los diversos usuarios.

Conclusión

El cambio climático global está produciendo en el Coropuna un retroceso glaciar acelerado: el macizo ha perdido, entre 1955 (123 km^2) y 2010 (47 km^2), 62% de su cobertura glaciar. Igualmente, el retroceso glaciar significa la pérdida de la masa y volumen de hielo de este macizo. Con la cobertura glaciar de 2003 y el espesor promedio del 2004 (93 m), se estimó el volumen equivalente de agua almacenada en el Coropuna en $36.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, pero desde 2003, el retroceso glaciar no ha dejado de manifestarse. En consecuencia, la disminución del volumen de agua es significativa. Para 2010, el volumen bruto almacenado en Coropuna fue estimado en 4.3146 km^3 (volumen equivalente de agua de $30.2 \times 10^8 \text{ m}^3$); sin embargo, a la fecha, el volumen debe ser menor a esas cifras.

El análisis de las precipitaciones alrededor de Coropuna muestra que durante El Niño de 1982/1983 y 1991/1992, la precipitación varió de manera deficitaria, mientras que durante el evento de 1997/1998, la variación fue positiva. Durante La Niña de 1988/1989, la precipitación fue variable, y durante el evento 1998/2001, fue positiva. Con referencia a Coropuna, desde el punto de vista de precipitación y temperatura, cada El Niño/La Niña es particular y es difícil hacer generalizaciones por las particularidades propias de estos fenómenos.

El retroceso glaciar implica la disminución de las reservas hídricas. Frente a esto, las autoridades, desde el gobierno central y los gobiernos regionales y locales, tienen que establecer políticas de adaptación urgentes para evitar los conflictos sociales. Caso contrario, la escasez del recurso hídrico va a resultar en un total desabastecimiento de agua, generando brechas sociales y económicas que afectarán aún más las condiciones de vida de la población rural y urbana de nuestro país.

Agradecimientos

Mis agradecimientos a Patrick Ginot (IRD Great-Ice, Francia) por los datos sobre la densidad, y a Henry Brecher (The Ohio State University, Byrd Polar and Climate Research Center) por las coordenadas del punto de perforación del equipo Thompson y el espesor de hielo. Igualmente, quisiera agradecer a mis colegas del PNUMA (Ginebra, Suiza), Pascal Peduzzi y Christian Herold, por haber compartido la experiencia Coropuna; sin olvidar, en Arequipa, Perú,

a los miembros de Zárata Expedition y COPASA. Igualmente en Perú, mi reconocimiento a Zoila Mendoza por las correcciones en español.

Referencias

- Albert, T., Klein, A., Kincaid, J. L., Huggel, C., Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Silverio, W. y Ceballos, J. L. (2014). Remote sensing of rapidly diminishing tropical glaciers in the northern Andes. *En Kargel, J. S., Leonard, G. J., Bishop, M. P., Kääb, A., Raup, B. H. (Eds). Global land ice measurements from space*, 609-638. Berlín y Heidelberg, Springer-Verlag.
- Ames, A., Dolores, S., Valverde, A., Evangelista, P., Corcino, J., Ganvini, W. y Zuñiga, J. (1988). *Glacier inventory of Peru* [versión en inglés]. Huaraz, Unidad de Glaciología e Hidrología, Hidrandina S. A.
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M.,... Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5, 849-859. doi:10.1038/nclimate2743
- Capotondi, A., Guilyardi, E. y Kirtman, B. P. (2013). Challenges in understanding and modeling ENSO. *PAGES news*, 21(2): 58-59. <https://doi.org/10.22498/pages.21.2.58>
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W. y Condom, T. (2010). Climate change threats to environment in the tropical Andes: Glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(supl. 1), 179-187. doi 10.1007/s10113-010-0177-6
- Francou, B. y Pouyaud, B. (2007). Retroceso glaciar y cambio climático en los Andes Centrales. En *¿El fin de las cumbres nevadas? Glaciares y cambio climático en la Comunidad Andina*, 19-29. Lima, Comunidad Andina.
- Francou, B., Ribstein, P. y Pouyaud, B. (1997). La fonte des glaciers tropicaux. *La Recherche*, 302, 34-37.
- Francou, B. y Vincent C. (2007). *Les glaciers à l'épreuve du climat*. Marseille, IRD Éditions.
- Francou, B. y Wagnon, P. (1998). *Cordillères andines: Sur les hauts sommets de Bolivie, du Pérou et d'Equateur*. Grenoble, Glénat.
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J. y Sicart, J.-E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 108(D5), 4154. doi:10.1029/2002JD002959
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V. y Cáceres, B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 109(D18106). doi:10.1029/2003JD004484
- Georges, C. (2004). 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Perú. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36(1), 100-107.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. y Salomonson, V. V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140.
- Hastenrath, S. y Kruss, P. D. (1992). Greenhouse indicators in Kenya. *Nature*, 355(6360), 503-504.
- Kaser, G., Juen, I., Georges, C., Gomez, J. y Tamayo, W. (2003). The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the Cordillera Blanca, Perú. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 130-144.
- 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, 1663-1683. doi:10.5194/tc-9-1663-2015
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2018). *Cold & warm episodes by season*. Recuperado de http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Peduzzi, P., Herold, C. y Silverio, W. (2010). Assessing high altitude thickness, volume and area changes using field, GIS and remote sensing techniques: The case of Nevado Coropuna (Peru). *The Cryosphere*, 4, 313-323. doi:10.5194/tc-4-313-2010

- Racoviteanu, A. E., Manley, W. F., Arnaud, Y. y Williams, M. W. (2007). Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 110–125.
- Silverio, W. (2005). *Cartografía multi-temporal de la cobertura glaciar de Nevado Coropuna (6425 m) entre 1955 y 2003*. Informe preparado para GTZ/COPASA.
- Silverio, W. (2007). *Application des SIG pour une gestion durable des ressources hydriques de la Cordillera Blanca (Pérou)* [Application of GIS for the sustainable management of the water resources in the Cordillera Blanca (Peru)]. Tesis doctoral en geografía. Université de Genève, Suiza.
- Silverio, W. (2008). *Análisis de los parámetros climáticos de las estaciones en la región del Nevado Coropuna (6425 msnm), Arequipa, Perú*. Informe preparado para GTZ/COPASA.
- Silverio, W. (2017). *Las cordilleras nevadas del Perú*. Lima, Edición Walter Silverio.
- Silverio, W. y Jaquet J.-M. (2012). Multi-temporal and multi-source cartography of glacial cover of Nevado Coropuna (Arequipa, Peru) between 1955 and 2003. *International Journal of Remote Sensing*, 33(18), 5876-5888.
- 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*, 69, 145-162.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79-96.
- Wagnon, P. (2001). El Niño et La Niña: les enfants terribles. *VerticalRoc*, sept./oct. 2001, 38-39.

Implementación de Dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú

Implementation of Two Bioremediation Systems as a Strategy for the Prevention and Mitigation of the Effects of Acid Rock Drainage in the Cordillera Blanca, Peru

Anaïs Zimmer¹, Mariza K. Brito Rodríguez^{1,2}, Cristiam J. Alegre Oropeza^{1,2}, Jhon W. Sánchez León¹, Jorge Recharte Bullard¹

¹The Mountain Institute (TMI), Huaraz, Ancash

²Facultad de Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Ancash

Resumen

En los Andes tropicales, los efectos del cambio climático son excepcionalmente intensos. Sus consecuencias son una amenaza para la conservación de los ecosistemas altoandinos, la biodiversidad y los diversos servicios ecosistémicos brindados a las poblaciones. Durante estos últimos 40 años, los glaciares peruanos han mostrado una reducción de 43% de su superficie, lo que tiene profundas implicancias en el abastecimiento de agua, en términos de cantidad y calidad. El retroceso glaciar deja expuestas a la intemperie rocas mineralizadas y ricas en sulfuro, alterando la calidad del agua, generando drenaje ácido de roca (DAR). Aunque se requiere de mayor investigación, uno de los supuestos es que el drenaje ácido natural de roca se produce por reacciones de oxidación y lixiviación de los minerales. Los metales son movilizados hacia los cuerpos aguas abajo, ocasionando cuadros de toxicidad en los ecosistemas acuáticos y en los usuarios de este recurso. En este artículo, proponemos la biorremediación como una estrategia eficaz y de bajo costo para mitigar los efectos de DAR y presentamos dos metodologías participativas aplicadas en campo. Entre 2013 y 2017, la Comunidad Campesina Cordillera Blanca, Recuay, Ancash, realizó una Investigación Acción Participativa, articulando conocimiento local y científico, para remediar las aguas del canal Chonta, alteradas por el fenómeno de DAR. La comunidad diseñó e implementó un sistema de biorremediación, recuperando la calidad del agua para su uso agrícola. En 2016, la misma experiencia fue replicada y perfeccionada por el Comité de Usuarios de Agua Shallap-Huapish-Toclla, Huaraz, Ancash, implementando un piloto. Estas dos experiencias se desarrollaron con el apoyo del Instituto de Montaña y de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo en Huaraz.

Palabras clave: *Retroceso glaciar, drenaje ácido de roca, biorremediación, comunidades altoandinas, humedales artificiales*

Abstract

Climate change effects are exceptionally intense in the tropical Andes. Their consequences constitute a threat to the conservation of ecosystems in the high Andes and to the biodiversity and ecosystem services provided to the population. During the last 40 years Peruvian glaciers have had an estimated reduction of 43% of their surface area, with serious consequences for the supply of water in terms of quantity and quality. The alteration of water quality due to acid rock drainage (ARD) is one of those consequences of glacier recession. Although further research needs to be conducted, it is proposed that glacier recession exposes mineralized rocks rich in sulfur. Oxidation reactions and leaching of minerals produce acid rock drainage. Metals are then mobilized toward bodies of water in lower areas, creating toxic conditions in aquatic ecosystems and in the human population that uses this resource. In this article, we propose bioremediation as a low-cost, effective strategy to mitigate the impacts of ADR, presenting two participatory methodologies used in the field for this purpose. Between 2013 and 2017, the Cordillera Blanca Rural Community of Recuay, Ancash, implemented a process of Participatory Action Research, connecting their local and scientific knowledge to remediate the water of the Chonta Canal, which had been altered by ADR. The community designed and implemented a bioremediation system which recovered the quality of the water used for agriculture. The same experience was replicated and improved by the Shallap-Huapish-Toclla Committee of Water Users in 2016, who implemented a pilot project in the province of Huaraz, Ancash. These two experiences were developed with the support of

The Mountain Institute and the Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo in Huaraz.

Keywords: *Glacial retreat, acid rock drainage, bioremediation, High Andean communities, artificial wetlands*

Introducción

Los Andes tropicales albergan el 99% de los glaciares tropicales del mundo, en territorio peruano se encuentra el 71%, en Bolivia el 21% y el 9% restante en Ecuador, Colombia y Venezuela (Rabatel et al., 2013). La Cordillera Blanca contiene el 70% de los glaciares tropicales del mundo. Esta cobertura de hielo representa la mayor fuente de agua para el uso doméstico, agrícola y ganadero de las ciudades de las cuencas media y baja del río Santa. Esto se debe a las funciones de los glaciares que almacenan agua en forma de nieve durante las temporadas de lluvias, y restituyen el agua en su forma líquida durante la sequía (Vuille et al., 2008).

El calentamiento global, la reducción de la cobertura nubosa, y los eventos extremos afectan la cobertura glaciar, y se observa un acentuado retroceso de los glaciares en los Andes tropicales, volviendo estos ecosistemas más sensibles. Desde los años 1974-1975 se ha acelerado el retroceso de glaciares en los Andes Tropicales, duplicando su tasa con respecto al siglo XIX (Kaser, 1999; Rabatel, 2005). Durante estos últimos 40 años, los glaciares peruanos han mostrado una reducción de 43% en su superficie (UGRH, 2014). Este rápido retroceso tiene profundas implicancias en el abastecimiento de agua que viene de las alturas del Parque Nacional Huascarán. Esto trae nuevos desafíos relativos a su oferta, en calidad y cantidad, para las poblaciones que dependen del deshielo de los glaciares para el consumo o el desarrollo de sus actividades económicas. Asimismo, desde hace varios años se observan alteraciones de los ciclos hidrológicos en los ríos y arroyos por efecto del cambio climático (Mark y McKenzie, 2007; Baraër et al., 2012). El deshielo deja expuestas a la intemperie rocas mineralizadas, lo que favorece su oxidación y lixiviación, produciendo drenaje ácido natural de roca (DAR) y movilización de metales (aluminio, fierro, cromo, cadmio, manganeso, arsénico, etc.) hacia los cuerpos de agua (Loayza, 2014; Loayza et al., 2014).

Esta problemática representa un constante riesgo debido a la biomagnificación o bioacumulación

de metales en la cadena trófica, lo que puede ocasionar cuadros de toxicidad crónica y afectar a las actividades económicas que dependen del agua, como la agricultura, ganadería, acuicultura, forestería, entre otros. Aún si la contaminación natural es en cierta medida inevitable, la velocidad a la que se está ocurriendo en los Andes peruanos sobrepasa las tasas normales, debido a los efectos de un cambio climático acelerado (Fortner et al., 2011).

Esta problemática se está presentando en los territorios de la Comunidad Campesina Cordillera Blanca, distrito de Olleros, Ancash, y del Comité de Usuarios de Agua Shallap-Huapish-Toella, distrito de Huaraz, Ancash. Evidencias tales como la desaparición de las truchas, la disminución de la productividad de los pastos, y el amarillamiento del agua y enrojecimiento de las rocas de los ríos, han llamado la atención de estas dos comunidades altoandinas, a lo largo de los últimos 40 años.

Este artículo presenta la metodología subyacente al desarrollo de sistemas para retirar del agua metales peligrosos para la salud humana, a partir de la experiencia en dos comunidades de la sierra de Ancash, donde se combinaron procesos de investigación campesina y de las ciencias ambientales para producir soluciones adaptadas al contexto y a las condiciones locales. La relevancia de este trabajo se debe a que la presencia excesiva de metales en el agua como consecuencia de procesos naturales es una situación que afecta a cientos de comunidades en los Andes. La aplicación efectiva de un enfoque de investigación-acción participativa permitió el diseño e implementación del sistema de biorremediación como gestión social de un aspecto, la calidad del agua, tradicionalmente no tratado en la gestión de recursos de uso común (Ostrom, 2000) en los pueblos andinos.

Drenaje Ácido de Roca por Retroceso Glaciar

Geológicamente, la Cordillera Blanca se encuentra en la cuenca Goyllarisquizga – Chicama del Jurásico – Cretáceo, caracterizándose por la presencia de ignimbritas, brechas volcánicas de la formación Oyotún (Jurásico inferior), batolitos y depósitos del Grupo Goyllarisquizga (Berrisiano – Aptiano). La pirita, mineral proveniente de la formación Chicama, está muy presente en la litología de la Cordillera Blanca (INGEMMET, 2011). La pirita (FeS_2) en presencia de oxígeno disuelto o hierro férrico (Fe^{3+}) se vuelve reactiva y altera la calidad del agua.

La pirita se degrada por reacción de oxidación y procesos de disolución, produciendo sulfato (SO_4^{2-}), hierro (Fe^{2+}) e hidrógeno (Moses et al., 1987). El hierro (Fe^{2+}) producido por la oxidación de la pirita, se oxida rápidamente en hierro férrico que se une con hidrógeno para formar hidróxidos de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) que son tóxicos para los ecosistemas acuáticos (Vuori, 1995).

A medida que el glaciar retrocede, se expone más pirita a la intemperie, y al oxidarse produce más drenaje ácido, liberando metales desde las cabeceras de cuencas hasta los diferentes cuerpos de agua. Asimismo, el sulfato reacciona con el hidrógeno del agua y produce ácido sulfúrico (H_2SO_4) que también es tóxico para la vida acuática. La cantidad de contaminantes presentes en el agua dependerá del tiempo de contacto del flujo de agua con la pirita, que está determinado por su trayectoria (University of Amsterdam, 2012). Numerosos estudios han demostrado la toxicidad de la pirita, los sulfuros y otros metales pesados, para la flora y fauna acuática, como las truchas (Vuori, 1995; Todd et al., 2007).

Técnica de Biorremediación

Los humedales altoandinos disponen de una importante capacidad de acumulación de agua además de un rol purificador del agua que los atraviesa. Estos funcionan como un filtrador de agua gracias a la reacción sinérgica entre vegetación, bacterias y suelo. Las partículas ácidas y/o metales pesados son secuestrados en las partes vegetativas y/o rizósfera del ecosistema a través de la acumulación, transformación y precipitación de estos (Palomino, 2007). En la flora andina encontramos muchas plantas con potencial biorremediador, capaces de acumular metales. Gracias a esa aptitud, estas especies han sido ya utilizadas con éxito en sistemas de humedales artificiales para tratar drenajes de relaves, desmontes mineros y vertidos domésticos cercanos al río Santa (Palomino, Paredes y Villanueva, 2005).

Los metales pesados y trazas se encuentran como partículas asociadas o en forma soluble, siendo las más disponibles y menos estables. Estos metales tienen una alta afinidad para la adsorción y complejización con la materia orgánica y se acumulan en la matriz del humedal. La secuestro total del metal se debe principalmente a la acción de las plantas y microorganismos. La movilización y absorción del metal por la planta implica una

acidificación del medio porque la raíz libera iones H^+ . Mediante transporte pasivo y/o activo, las especies vegetales pueden acumular los componentes tóxicos gracias a procesos de quelación y translocarlos a las partes aéreas (Chin, 2007). Cabe resaltar que, en algunos casos, solamente hay inmovilización en las raíces, mas no translocación, lo cual se manifiesta en una elevada concentración del metal en la raíz en comparación con la biomasa aérea de la planta (Rascio y Navari-Izzo, 2011).

Los micrófitos de los humedales también tienen un rol importante, proveyendo oxígeno a la materia orgánica de la matriz, catalizando las reacciones entre plantas y bacterias sulfatorreductoras (BSR). Adicionalmente, las plantas del humedal pueden potencialmente estimular el crecimiento de las bacterias que oxidan el metal por transferencia de oxígeno en la rizósfera. Palomino et al. (2007) demuestran que la capacidad de biorremediación de un sistema de humedal para remover metales pesados varía entre un 23% hasta un 98%, dependiendo del metal tratado.

Historia de la Comunidad Campesina Cordillera Blanca en Olleros y del Comité de Usuarios de Agua Shallap-Huapish-Toclla en Huaraz

Comunidad Campesina (abreviada C.C.) Cordillera Blanca, Olleros, Subcuenca del Río Negro

Después del terremoto de 1970, los miembros de la C.C. Cordillera Blanca han observado una creciente alteración de la calidad del agua del río Negro (Figuras 1 y 2). Este evento sísmico importante, además de matar a miles de personas en la región, causó enormes avalanchas en el área y alteró gran parte de la geografía, cambiando las trayectorias de los flujos de agua y agregando metales a fuentes de agua como es el caso del río Negro. Si bien, según la comunidad, la alteración de la calidad del agua comenzó abruptamente como resultado del terremoto, el proceso ha continuado y, de hecho, se ha acelerado en las últimas décadas como consecuencia del DAR, producido y amplificado por el retroceso glaciar acelerado (Kaser, 1999; Rabatel, 2005).

En 2010, la comunidad identificó como prioridad ambiental el problema de la mala calidad de sus aguas debido al DAR. Para responder a esta problemática, el CIAL acordó con las autoridades y la asamblea



Figura 1. Drenaje ácido de roca (DAR) en el río Negro, 2017. Foto: S. Tegel.

de la C.C. Cordillera Blanca realizar un trabajo de investigación para remediar la calidad del agua del canal de riego Chonta. Esta investigación se convierte entonces en un proceso de aprendizaje sobre el manejo de este tipo de sistemas novedosos para la gestión colectiva.

En el marco del proyecto “Punas y Agua: Promoviendo la seguridad hidrológica del sistema agrario andino a través de la conservación de ecosistemas de puna húmeda del norte andino” y posteriormente “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña”, el Instituto de Montaña apoyó el proceso de investigación de este problema del “Comité de Investigación Agropecuaria Local Alli Pasto Alli Yacu (CIAL)”. El proceso de investigación seguido por el CIAL se describe luego en mayor detalle. En síntesis, el CIAL lideró para beneficio de la comunidad el mapeo participativo de todas las fuentes de agua de la comunidad, naturales y canales, y se entrenó en el uso de kits ecológicos para monitorear la calidad de las principales fuentes de agua de su territorio. Los resultados de los análisis de agua mostraron un pH alrededor de 3 y la presencia de metales pesados que sobrepasaban los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs), empoderando a los comuneros para el diálogo horizontal con los técnicos.

Con la finalidad de contar con información, se cooperó en 2012 con L. H. Cammeraat y estudiantes del Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics de la Universidad de Ámsterdam que realizaron un curso de campo durante el cual se generó información científica sobre (1) desglaciación y calidad de agua, (2) factores abióticos y su relación con la vegetación local, (3) evaluación hidroquímica de la subcuenca del río Negro, y (4) uso de suelos como amortiguador natural para aguas contaminadas, y (5) formación



Figura 2. Piedras enrojadas por efecto de DAR en el territorio de la C.C. Cordillera Blanca, 2017. Foto: S. Tegel.

posglacial del suelo. Durante este trabajo, se han encontrado altas concentraciones de hierro y sulfatos en el río Negro, lo que implica que debe haber alguna fuente de pirita en la región. La geología de la parte superior de la subcuenca se compone principalmente de la formación Chicama, lo que revela presencia de pirita en la región. Además, estos estudios demostraron la presencia de pirita en depósitos morrénicos en la parte superior de la subcuenca. Esta pirita está más expuesta a la intemperie, convirtiéndola en una mayor fuente de DAR (University of Amsterdam, 2012).

Comité de Usuarios de Agua (abreviado C.U.) Shallap-Huapish-Toclla, Huaraz, Microcuenca Auqui

Al igual que la C.C. Cordillera Blanca, la población de la microcuenca Auqui, cerca de Huaraz, ha observado alteraciones en la calidad del agua en los últimos 40 años, mencionando la desaparición de las truchas, aumento de enfermedades y disminución en la productividad agrícola.

En el año 1974, se aprobó la construcción de un canal matriz de 20 km uniendo las partes altas de Shallap, Huapish y Toclla, pero este proyecto no se culminó. En 2012, se retomó el proyecto con el nombre de “Mejoramiento y Ampliación del sistema de riego Shallap – Huapish – Toclla, distrito de Huaraz, provincia de Huaraz – Ancash” (código SNIP N° 83853). Este fue financiado por un total de S/. 17,344,000 del fondo “Mi Riego” del Ministerio de Agricultura y Riego. Sin embargo, entre la fecha de presentación de la primera solicitud del sistema de riego, hecha por la C.C. Pedro Pablo Atusparia al Ministerio de Agricultura y Riego, y la fecha de aprobación del proyecto, pasaron 40 años, durante los cuales el glaciar Shallap retrocedió y,

por consecuencia, se alteró la calidad del agua de la quebrada Shallap debido al DAR (Figura 3).

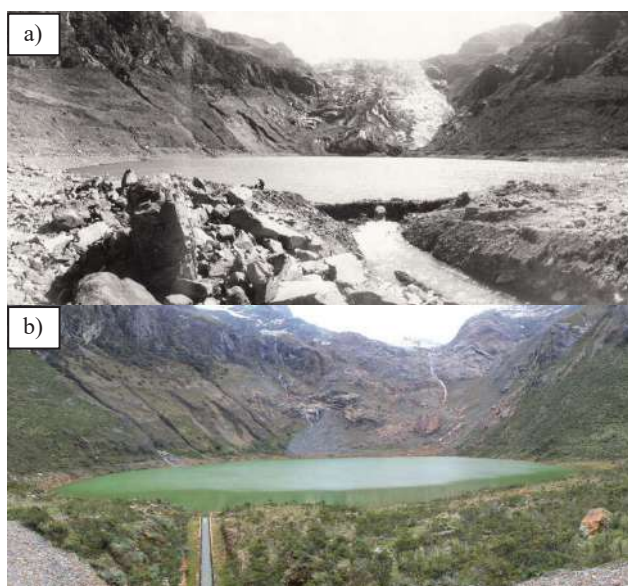


Figura 3. Fotografía de la laguna Shallap: (a) 1972 y (b) 2018, testigo del retroceso glaciar y drenaje ácido de roca. Fotos: UGRH.



Figura 4. DAR en la quebrada Shallap, 2014. Foto: R. Loayza.

En el caso de este grupo de regantes, el proceso de participación activa en la iniciativa se origina en visitas hechas por los usuarios a la experiencia de la C.C. Cordillera Blanca y el intercambio entre campesinos. Como en el caso anterior, se contó en este con información científica sobre calidad de agua para guiar el proceso de intervención. En 2013-2014, el Dr. Raúl Loayza Muro, de la Universidad Peruano Cayetano Heredia, realizó un estudio de la calidad de agua del río Shallap, que abastece de agua al canal Shallap-Huapish-Toclla. Los valores de metales en el agua se compararon con los ECAs vigentes para la Categoría I (aguas de uso poblacional que pueden ser potabilizadas) para identificar los potenciales riesgos para las poblaciones, y con la Categoría III (aguas

para riego de vegetales y bebida de animales para determinar potenciales impactos de la contaminación en la salud humana a través del consumo de productos agropecuarios). Los resultados indicaron que el agua de la captación del canal Shallap-Huapish-Toclla tiene un pH ácido (4.1), con una conductividad eléctrica alta, y altas concentraciones de aluminio, hierro, manganeso, arsénico, cadmio y cromo (Loayza, 2014; Loayza et al., 2014; Figura 4).

Metodología: Área y Sitios de Estudio

C.C. Cordillera Blanca, Recuay, Ancash

La comunidad está conformada por 135 familias. La subcuenca del río Negro se ubica a unos 20 km al sur de la ciudad de Huaraz, en el distrito de Recuay, Provincia de Recuay, Región Ancash (Figura 5). El río Negro es un afluente del río Santa, el cual desemboca en el océano Pacífico. La subcuenca mide próximamente 20 km de este a oeste y 8 km de norte a sur (9°38'40 S; 77°23'12 W). Las altitudes van desde 3300 msnm cerca del río Santa a más de 5600 msnm, donde se encuentran los glaciares.

El clima de la región tiene dos estaciones, húmeda y seca, con una alta variación diaria de temperatura (Kaser, Ames y Zamora, 1990). Las temperaturas alcanzan los 20 °C a 4000 msnm al mediodía, pero caen a menos de 0 °C durante la noche. El ochenta por ciento de la precipitación anual ocurre en la estación húmeda (Mark et al., 2010) entre los meses de octubre a abril, alcanzando su valor máximo entre enero y marzo (Silverio y Jaquet, 2005). Igualmente, la descarga del río Negro aumenta también durante los meses húmedos de octubre a abril (Mark et al., 2010).

El sistema de biorremediación implementado por la comunidad se encuentra en el área del canal Chonta (Figura 5).

C.U. Shallap-Huapish-Toclla, Huaraz, Ancash

La microcuenca Auqui pertenece hidrográficamente a la subcuenca del río Quillcay, cuenca del río Santa, y desemboca en el Pacífico. La microcuenca nace en la parte occidental de la Cordillera Blanca y corre de este a oeste hasta confluir con el río de la quebrada Cojup para conformar el río Quillcay (Figura 6). La quebrada Shallap tiene un área aproximada de 41.0 km² (9°30'0 S; 77°23'0 W), y

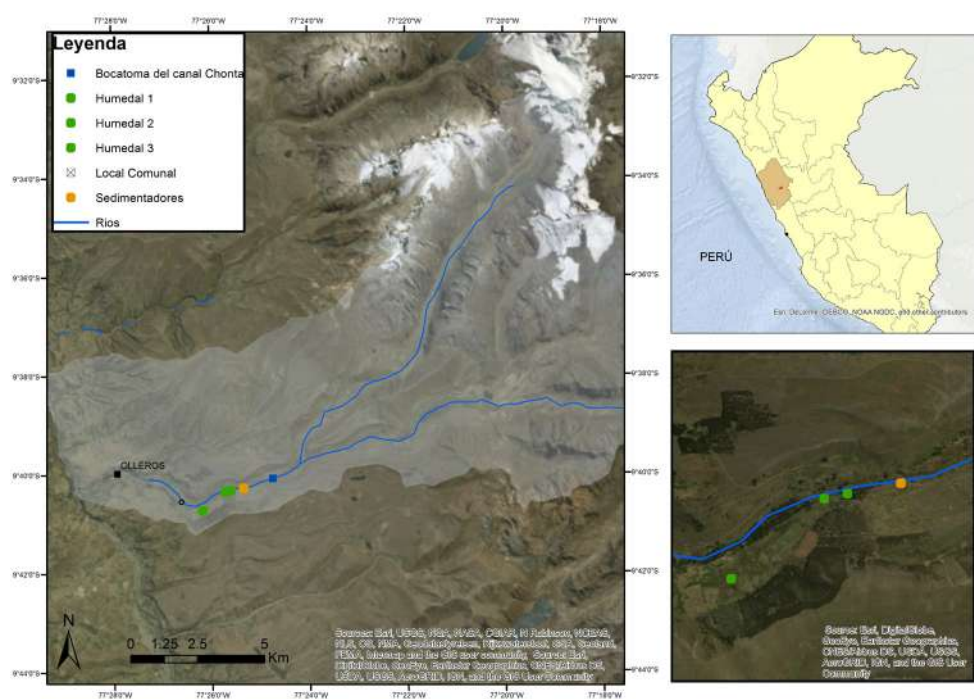


Figura 5. Ubicación del sistema de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca.

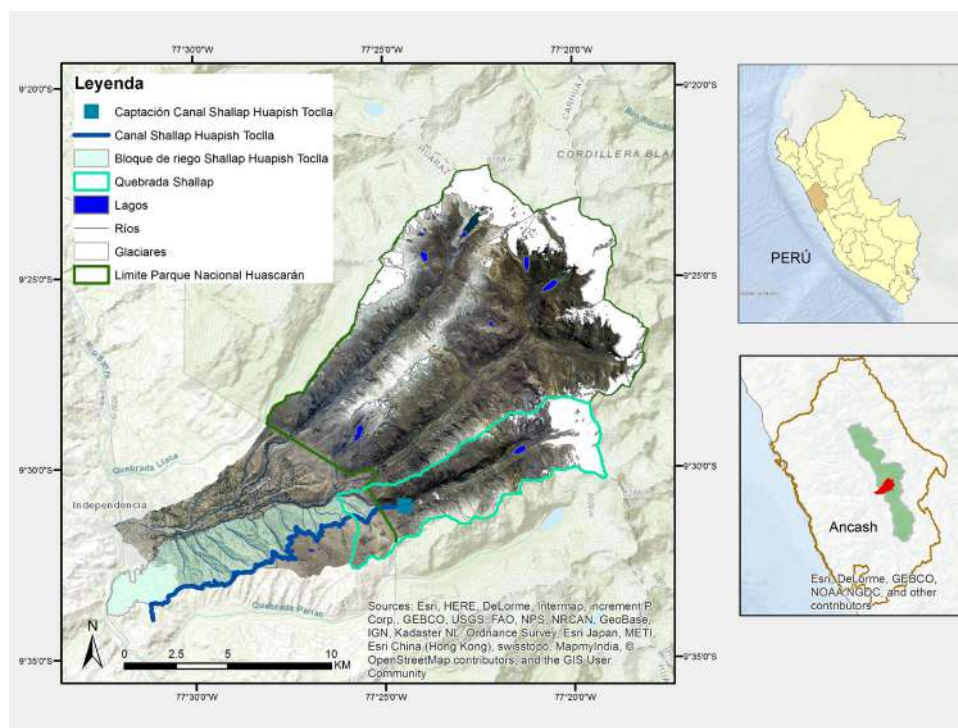


Figura 6. Ubicación del canal matriz Shallap-Huapish-Toclla en el ámbito de la subcuenca Quillcay.

la parte de la subcuenca que alimenta al canal tiene un área aproximada de 32.0 km², la cual posee una cobertura glaciar en aproximadamente un 20.0% de su superficie. La bocatoma del canal de riego Shallap-Huapish-Toclla se ubica a una altitud de 4109 msnm (9°30'59.63"S - 77°24'28.31"O). El escurrimiento natural del río Shallap se origina como consecuencia de las precipitaciones estacionales y del aporte de glaciares (Quesquén Rumiche, 2007; Chisolm, 2016). En época de estiaje, durante los meses de junio a noviembre, el río Shallap cuenta con caudal

permanente, debido a la presencia de nevados que contribuyen con sus deshielos a elevar el caudal de estiaje, y asegurar la regulación natural de la laguna Shallap (Chisolm, 2016). El régimen de descargas se caracteriza por ser irregular, torrencioso y con marcadas diferencias entre sus parámetros extremos, como la mayoría de los ríos de la Vertiente del Pacífico.

El bloque de riego de Shallap-Huapish-Toclla es uno de ocho bloques de riego en la cuenca Quillcay creados por la Comisión de Regantes Quillcay

(Quesquén Rumiche, 2007). De los ocho bloques de riego, Shallap-Huapish-Toclla tiene la mayor área de actividad agrícola, 2656 ha, que representan un 63% del total del área agrícola bajo la supervisión de la Comisión, cuyos usuarios dependen directamente del canal (Quesquén Rumiche, 2007). La gestión y operación del canal Shallap-Huapish-Toclla y su bloque de riego corresponde al C.U. Shallap-Huapish-Toclla, que tiene 3040 usuarios (Quesquén Rumiche, 2007; Bedón López, 2012).

El canal Shallap-Huapish-Toclla se encuentra en el distrito de Huaraz, provincia de Huaraz, Región Ancash. El sistema de biorremediación (Figura 7) implementado por el C.U. Shallap-Huapish-Toclla se encuentra en los sectores Campanayoc y Quinchupinos del canal Shallap-Huapish-Toclla, a una altitud de 3652 msnm (225869 E; 8943140N UTM). El número de usuarios de los sectores involucrados en la biorremediación fue de 100 personas.

Saberes Locales, Investigación, Acción Participativa y Conocimiento Científico

Las dos experiencias de biorremediación de DAR, del Canal Chonta (C.C. Cordillera Blanca) y del canal Shallap-Huapish-Toclla, tienen la singularidad de haber unido saberes locales de la comunidad y conocimiento científico de universidades asociadas. En ambos casos, el Instituto de Montaña brindó el apoyo metodológico y apoyó el proceso de aprendizaje local y codesarrollo de las soluciones. El caso de la

C.C. Cordillera Blanca es singular en el sentido que allí se inició la primera experiencia de investigación participativa sobre el problema de calidad de agua en el año 2010, y ha continuado hasta la actualidad viendo aspectos del manejo. En esta comunidad, la experiencia se realizó con apoyo técnico del tesista Víctor Garro y del profesor Julio Palomino Cadenas de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM). El caso del sistema de biorremediación de Shallap-Huapish-Toclla fue una réplica del sistema desarrollado por la C.C. Cordillera Blanca, pero en una escala mayor. El Instituto de Montaña facilitó el proceso de participación local, brindó apoyo de materiales y supervisó a dos tesistas de la UNASAM, Mariza Brito Rodríguez y Cristiam Alegre Oropeza, asesorados por el profesor Palomino.

El aporte de la comunidad en ambos casos fue continuo, contribuyendo a la identificación de las causas de la alteración de la calidad de agua, de los impactos del retroceso glaciar y dando sus percepciones sobre cambio climático en general. En ambos casos, los pobladores locales participaron en la selección de las especies fitorremediadoras, mientras que las universidades asociadas apoyaron en definir tecnologías de biorremediación adaptadas a las condiciones locales, incluyendo el uso de bacterias sulfatorreductoras, sobre la base de estudios detallados de geomorfología, sistemas de riego y calidad del agua. En conjunto, las comunidades, los tesistas y el Instituto de Montaña diseñaron los sedimentadores, las celdas de los humedales y los

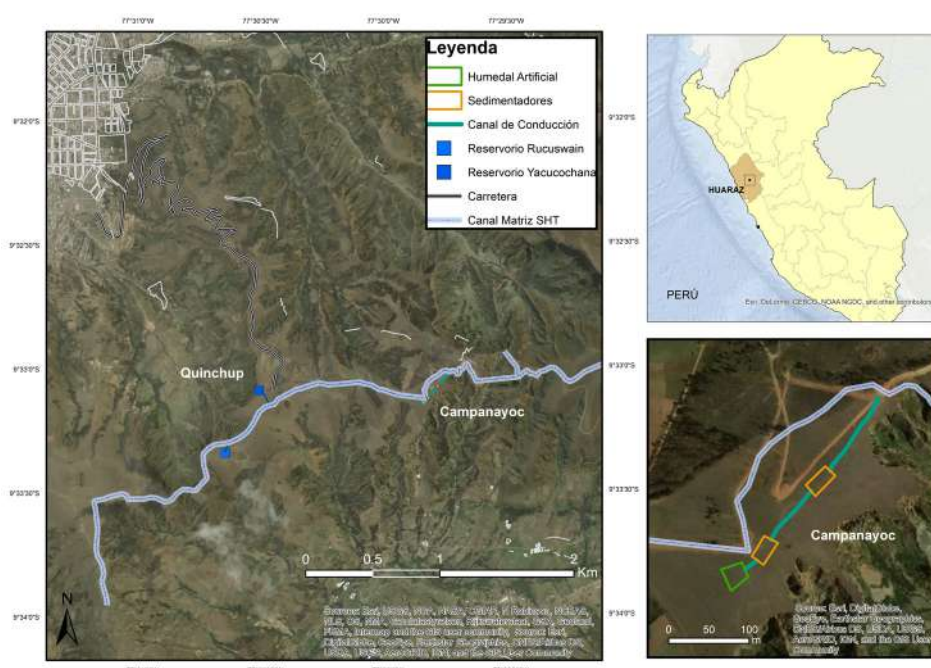


Figura 7. Ubicación del sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

canales de conducción. La innovación fue adaptar la técnica científica a condiciones locales y generar interacciones entre científicos y estudiantes con el grupo local de investigadores, gracias al trabajo del Instituto de Montaña (Figura 8).



Figura 8. Investigadora del CIAL tomando una muestra de agua del río Negro, 2012. Foto: TMI.

La formación del Comité de Investigación Agropecuaria Local (CIAL) se enmarca en el enfoque y metodologías de investigación-acción participativa que se desarrolla con comunidades:

Esta metodología valora el conocimiento técnico nativo y busca que los agricultores participen desde la definición de los problemas, identifiquen las posibles soluciones, investiguen para dar solución al problema y finalmente retroalimentar a toda la comunidad sobre los resultados de la investigación. Para ello, la comunidad, sindicato o ayllu debe elegir a un comité o grupo de agricultores, a quienes se les delega la responsabilidad de investigar en el problema priorizado. (Ashby, Quirós y Roa, 2009:2)

La experiencia de biorremediación con la C.C. Cordillera Blanca siguió un conjunto de pasos que permite incorporar las prioridades y los saberes locales. La Investigación Participativa (IP) – también llamada Investigación Acción Participativa (IAP) o Investigación Acción (IA) — se basa en tres pilares:

Investigación - creencia en el valor y el poder del conocimiento y el respeto hacia sus distintas expresiones y maneras de producirlo. El CIAL definió su problema y pregunta de investigación; se entrenó en el uso del medidor multiparámetro de calidad de agua y conceptos básicos de calidad (Figura 8); realizó mapas de la calidad de agua en toda la comunidad;

informó sobre opciones a la asamblea y autoridades de la comunidad; en diálogo horizontal con expertos externos, concluyó y recomendó a la comunidad invertir recursos y esfuerzo para desarrollar un sistema de biorremediación; y, finalmente, acompañó activamente el diseño, la implementación y manejo del sistema, contribuyendo con conocimientos locales no solo sobre especies vegetales a usar en el sistema sino, sobre todo, conocimiento sobre los aspectos sociales de gestión de este proceso con la comunidad.

Participación - enfatizando los valores democráticos y el derecho a que las personas controlen sus propias situaciones y destacando la importancia de una relación horizontal entre los investigadores y los miembros de una comunidad. La C.C. Cordillera Blanca, en asamblea, priorizó sus problemas de investigación, destacando como el de mayor urgencia la calidad del agua en el río Negro y su principal canal de riego. Las autoridades delegaron la autoridad de investigar y proponer soluciones al CIAL. El CIAL reportó de manera regular sus hallazgos y entendimiento del estado del agua, las opciones y recomendaciones propias y de los técnicos externos. De manera importante, seguir procedimientos que faciliten la participación permitió un diálogo horizontal entre ‘colegas’ investigadores locales y externos para encontrar soluciones adecuadas al contexto.

Acción - como búsqueda de un cambio que mejore la situación de la comunidad involucrada (Zapata y Rondán, 2016; Greenwood y Levin, 1998). En la C.C. Cordillera Blanca, el proceso metodológico de formar un grupo local que sigue procedimientos sencillos de investigación, plantearse un problema de investigación, recuperar evidencia, entenderla y usarla, potenció la capacidad de actuar. Por ejemplo, el rol de mujeres en el estudio del agua y la propuesta de biorremediación mejoró su capacidad de comunicarse en las asambleas. El empoderamiento de los investigadores locales a través del entrenamiento como investigadores locales facilita la participación de la comunidad en la implementación, pues son campesinos transmitiendo a campesinos la propuesta de acción. De igual forma, este enfoque ayudó a que los comuneros tomaran acción para movilizar el apoyo de la Municipalidad Provincial de Recuay, proveyendo materiales, víveres y equipo durante las faenas comunales.

Sistemas de Biorremediación

La biorremediación es una alternativa que utiliza la diversidad biológica para mitigar y eliminar los efectos nocivos causados por los contaminantes en los ecosistemas (Garzón et al., 2017). Los sistemas de biorremediación implementados en las dos comunidades tienen la finalidad de remover los contaminantes generados por DAR. Esta tecnología se compone de (1) canales de conducción, (2) celdas de sedimentación y (3) humedales artificiales, buscando simular las propiedades y capacidades de los arroyos y humedales naturales (Sheoran y Sheoran, 2006).

En el marco de la Investigación Acción Participativa desarrollada por el CIAL en Canrey Chico, se usaron diseños de ingeniería y experimentos biológicos. Estos resultados preliminares de la comunidad sirvieron de base para el diseño del sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

El CIAL definió su experimento enfocándose en los componentes físico y biológico. El componente físico consistió en la construcción de celdas de sedimentación y canales de conducción mediante

faenas comunales. El componente biológico simuló la sinergia que existe entre las plantas fitorremediadoras, el suelo y las bacterias, usados en las celdas de humedales artificiales construidas. En el caso del C.U. Shallap-Huapish-Toclla, se aplicó un tercer componente, el químico, que consistió en la aplicación de un aditivo al sistema para favorecer la precipitación de algunos metales antes del tratamiento biológico. Los tres componentes, físico, químico y biológico se detallan en la Figura 9.

Componente Físico del Sistema de Biorremediación

El diseño del sistema, para ambas comunidades, tomó en cuenta la oferta de agua y la estimación de la población local de sus áreas potenciales de riego (Figura 10). La definición del caudal de ingreso a los sistemas fue clave para asegurar la funcionalidad de los humedales. En la C.C. Cordillera Blanca, se estimó un área potencial de riego de 173 ha, proyectándose tratar un caudal de 80 l/s, y el C.U. Shallap-Huapish-Toclla estimó un área potencial de riego de 110 ha, proyectándose tratar un caudal de 50 l/s.

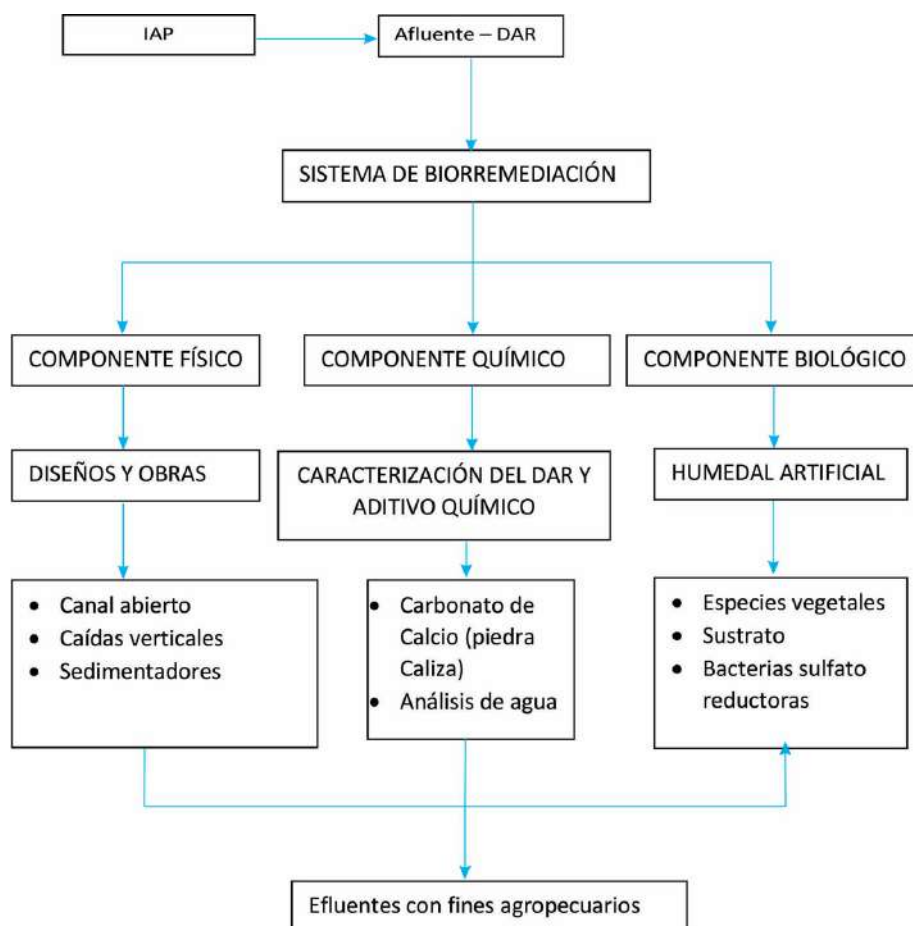


Figura 9. Flujograma de la aplicación de los tres componentes al DAR.

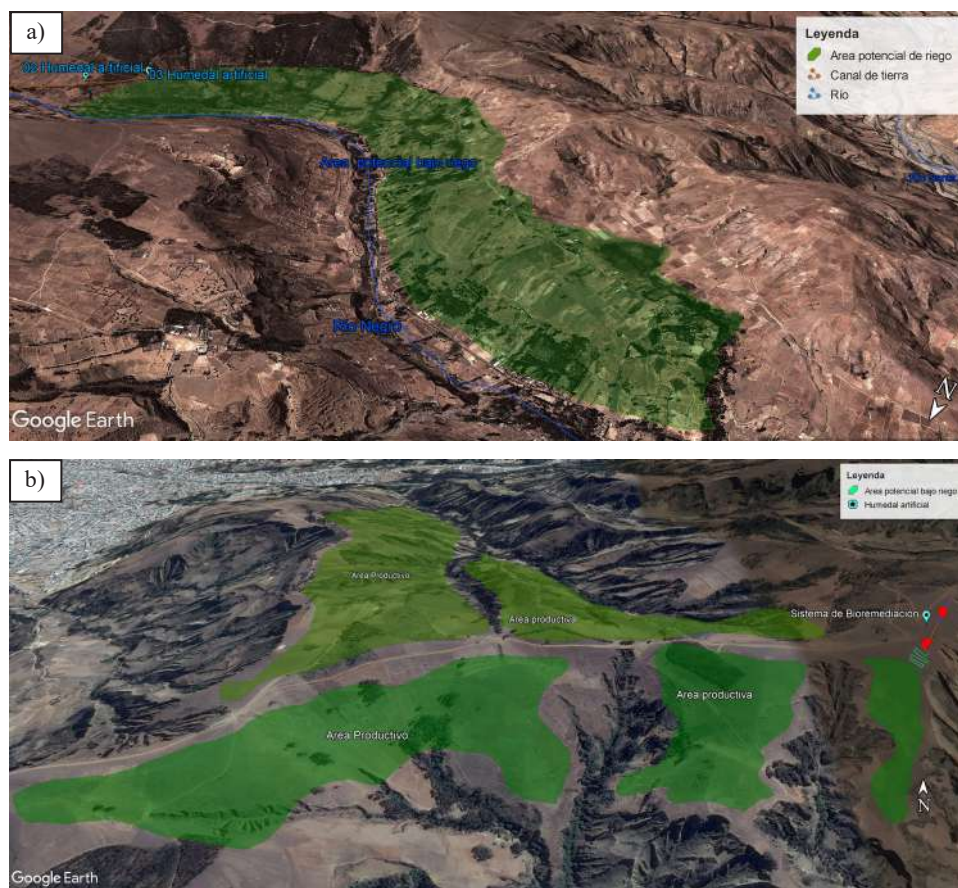


Figura 10. Áreas potencialmente productivas: a) C.C. Cordillera Blanca, b) C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

El sistema de la C.C. Cordillera Blanca trata una parte del agua del canal Chonta (Figuras 5 y 13), gracias a un desvío y la construcción de un canal de tierra. La parte física del sistema de la C.C. Cordillera Blanca consiste en tres sedimentadores de 4.5 m x 9.5 m x 1.2 m, impermeabilizados con mampostería simple (Figuras 11 y 12). Los sedimentadores son sistemas aerobios que consisten en una serie de celdas de sedimentación que están conectadas, por las que el agua circula lentamente por flujo horizontal superficial. Esta estructura permite que se depositen los sedimentos inorgánicos y orgánicos en su base, reteniéndolos. A la entrada de los sedimentadores se colocaron dos compuertas metálicas de 40 cm x 60 cm para controlar el caudal de entrada. Además, se instalaron tres válvulas de purga para la remoción de los sedimentos acumulados (Figura 13).

El diseño de ambos sedimentadores se realizó con el apoyo de ingenieros civiles, proporcionando planes de construcción a la comunidad para su validación en asamblea. Los planes se basaron en datos de levantamiento topográfico y de estudio de suelo, con el objetivo de obtener un sistema lo más eficiente posible para la sedimentación y precipitación de las partículas gruesas presentes en el agua de los canales. En el caso de la C.C. Cordillera Blanca, el componente

de ingeniería civil fue más somero porque se disponía de menos datos topográficos.

El diseño del sistema del C.U. Shallap-Huapish-Toclla consideró dos sedimentadores de concreto armado, con dimensiones de 5 m x 20 m x 3.2 m (Figuras 14 y 15). Cada sedimentador tiene una válvula de PVC de 4" para purgar los sedimentos. El agua del canal matriz Shallap-Huapish-Toclla se capta gracias a una unión de HDP de 4", colocada en la bocatoma. Además, para controlar el caudal de entrada, se colocó una válvula de PVC de 4" (Figura 16). A diferencia del sistema de la C.C. Cordillera Blanca, en Shallap-Huapish-Toclla se usaron caídas verticales para aumentar el oxígeno disuelto en el agua y favorecer la oxidación y sedimentación de algunos metales en las celdas del sistema. Estas caídas simulan arroyos naturales que se encuentran en las quebradas altoandinas.

El diseño de los humedales artificiales de la C.C. Cordillera Blanca se compone de tres celdas de humedales de forma sinusoidal de 3 m de ancho, 0.70 m de profundidad y 51 m de largo (celda 1), 39 m (celda 2) y 83 m (celda 3) (Figuras 11, 12 y 13). Las celdas fueron construidas con una inclinación de 0.5%, para que el agua discurra lentamente. En

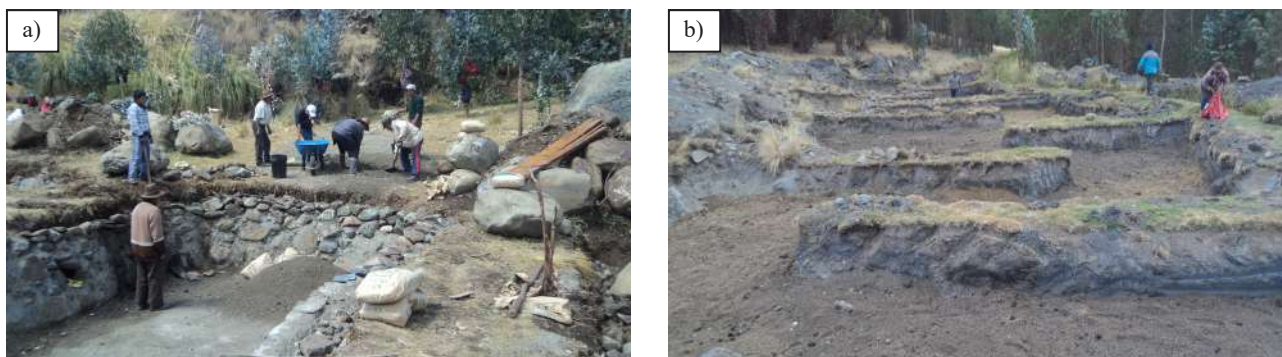


Figura 11. Proceso de construcción del sistema de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca: (a) sedimentadores y (b) humedales, 2014. Fotos: TMI.

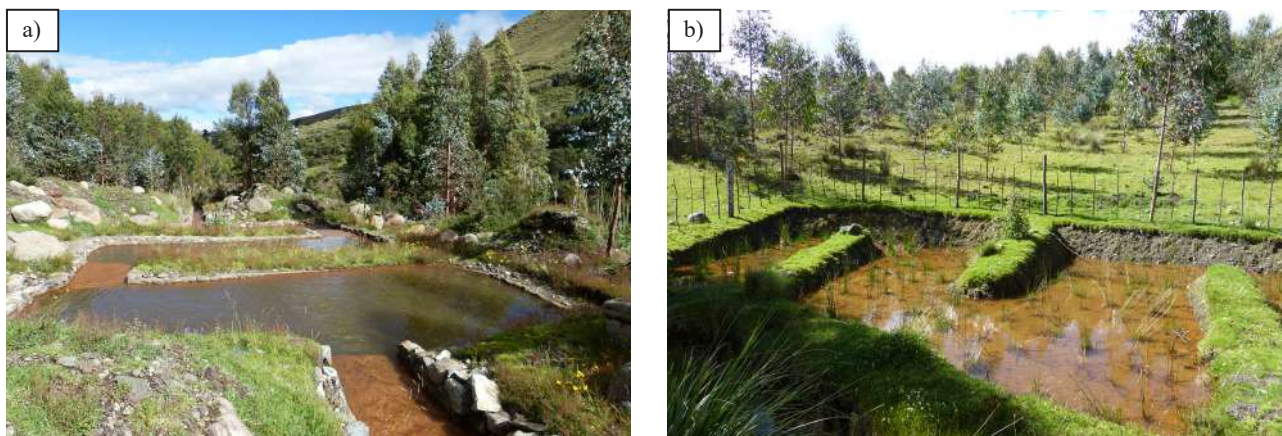


Figura 12. Sistema de biorremediación finalizado de la C.C. Cordillera Blanca: (a) sedimentadores y (b) humedales, abril 2015. Fotos: A. Zimmer.

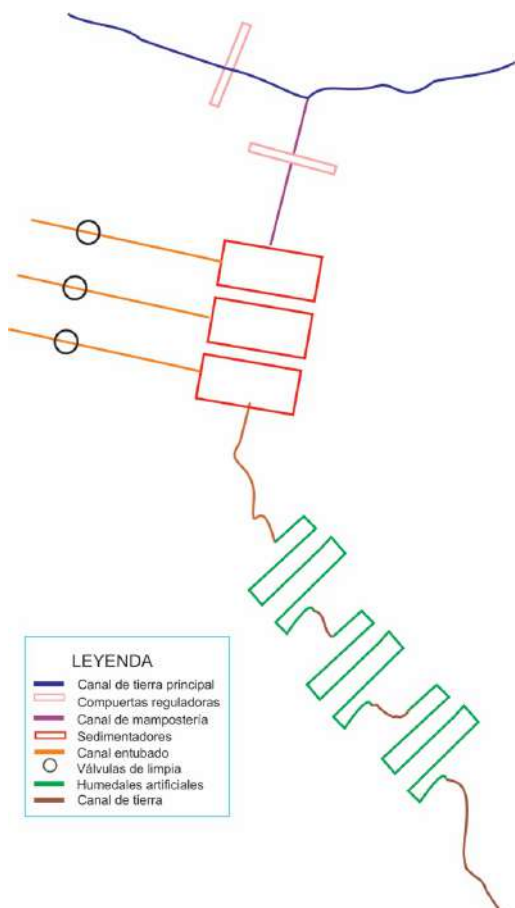


Figura 13. Estructuras hidráulicas construidas por la C.C. Cordillera Blanca.

el caso del C.U. Shallap- Huapish-Toclla, el diseño consideró una celda de humedal de 16 m x 2 m x 0.6 m, construida con una inclinación de 1% (Figuras 14, 15 y 16).

El sustrato de los humedales del sistema de la C.C. Cordillera Blanca se compone de tres capas: una de arena gruesa, otra de turba y estiércol, y una tercera de arena gruesa. En el caso de Shallap-Huapish-Toclla, el sustrato tiene, además de capas de arena gruesa y materia orgánica, una capa de grava, y todas se distribuyen de arriba hacia abajo: arena gruesa, mezcla de turba y estiércol, arena gruesa y grava (Tabla 1; Figuras 17 y 18). La turba tiene poros más pequeños y permite homogenizar la distribución del agua (Garzón et al., 2017). El estiércol aporta nutrientes al componente biológico del sistema (bacterias sulfatorreductoras y especies fitorremediadoras) (Palomino, 2007). Asimismo, la turba y el estiércol son coloides importantes que también inmovilizan los metales propios de los drenajes ácidos. En ambos casos, los estratos sedimentarios de los humedales se definieron según el conocimiento local de la comunidad, con el asesoramiento del profesor Palomino y de los tres tesisistas involucrados, a través de procesos participativos.



Figura 14. Proceso de construcción del sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla: (a, b) sedimentadores y (c) humedales, setiembre-noviembre 2016. Fotos: A. Zimmer.

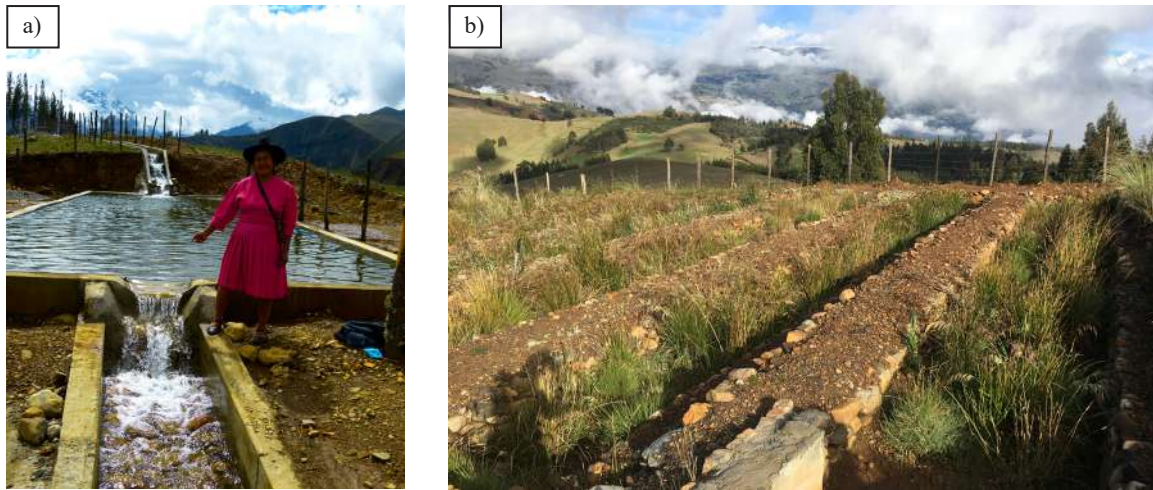


Figura 15. Sistema de biorremediación finalizado del C.U. Shallap-Huapish-Toclla: (a) sedimentadores y (b) humedales, 2017. Fotos: A. Zimmer.

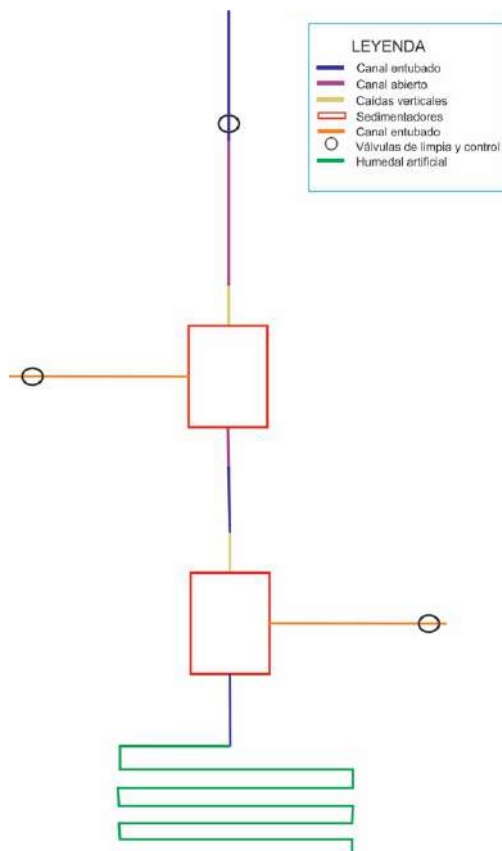


Figura 16. Estructuras hidráulicas construidas por el C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

Componente Químico

En el sistema de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca, se tomó una muestra de agua inicial el 22 de junio 2011 (época seca) en la captación del canal Chonta, a 200 m de la entrada al primer sedimentador. La muestra fue analizada en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM y se evaluaron los siguientes parámetros: pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, turbiedad, sulfuros, sólidos totales en suspensión y metales totales. Los métodos empleados fueron los siguientes: para el pH, APHA 4500-H B versión 2005; para la conductividad, APHA 2510 B versión 2005; para la temperatura, APHA 2550 B; para la turbiedad, APHA 2130 B; para el arsénico total, Plata – DDTC; para el cadmio total, Derivé de cation; para el hierro total, Triazina; y para el plomo total, PAR.

En el caso del sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla, la muestra inicial de agua y sedimento se tomó el 6 de agosto 2016 (época seca) en la captación del canal Shallap-Huapish-Toclla. Se evaluaron los mismos parámetros que en el caso de C.C. Cordillera Blanca, en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM, usando la misma

metodología, excepto para metales totales. El análisis de metales en las muestras de agua y sedimento se realizó por espectroscopia de emisión acoplada a plasma (ICP-ES), que permite la detección simultánea de más de 25 metales, realizado por el Laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C.

Evaluación de la Influencia del pH en la Remoción de Metales Pesados

En el caso del sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla, se tiene proyectado poner piedras calizas en las paredes del canal de conducción. Las piedras ayudarán a reducir la acidez del agua y generar alcalinidad, incrementando la precipitación de los metales como hidróxidos (de hierro, manganeso y aluminio) mediante reacciones de oxidación e hidrólisis (Da Silveira, Silva y Rubio, 2009). Esta agua pretratada, al llegar a los humedales artificiales, presentará una alcalinidad neta que sea capaz de neutralizar la acidez generada en la hidrólisis de los metales, así se evitará un descenso del pH y la consiguiente movilización de los hidróxidos ya formados (López Pamo, Aduvire y Baretino, 2002). La Bachiller Mariza Brito Rodríguez, de la UNASAM aborda este tema desarrollando su tesis de pregrado denominada “Optimización de un sistema remediador aeróbico para la remoción del hierro y manganeso presentes en el agua del río Shallap – Huaraz - 2017”. Esta tesis buscará optimizar los procesos de precipitación química y biológica para eliminar eficazmente el hierro y manganeso de las aguas de DAR y ser utilizados para el mejoramiento del sistema de biorremediación. Una de las pruebas desarrolladas en esta investigación busca identificar el pH óptimo para lograr una eficiente remoción de hierro, manganeso y aluminio de las aguas del río Shallap. Para su realización, se tomaron seis conos de sedimentación de un litro cada uno, los cuales fueron sometidos mediante agitación manual a diferentes dosificaciones de lechada de cal con el fin de alcanzar los siguientes pH: 4, 5, 6, 7, 8, 9, respectivamente. Las muestras neutralizadas se dejaron sedimentar y una vez que la solución se había establecido, la muestra decantada se envió para su análisis.

El sistema de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca no adiciona ningún agente de neutralización. Sus procesos de incremento del pH se llevan a cabo principalmente a nivel de los humedales.

Componente Biológico

Los humedales artificiales de los dos sistemas presentan una fase aerobia y una anaerobia. La primera favorece el contacto entre el agua contaminada con DAR y el aire mediante el empleo de plantas acuáticas seleccionadas por la comunidad. El substrato oxigenado del humedal propicia la formación de un hábitat para que se desarrollen ciertas colonias de bacterias que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación de los contaminantes presentes en el humedal, transformando en el caso del hierro el Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual finalmente precipita en forma de hidróxido de hierro (López Pamo, Aduvire y Baretino, 2002). En las capas inferiores del substrato, se presentan condiciones anaerobias, especialmente en la capa de materia orgánica. Es en esta capa donde tiene lugar la reacción de reducción del sulfato con intervención de microorganismos bacterias sulfatorreductoras, capaces de utilizar su reacción con la materia orgánica del substrato (CH_2O) y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía para su metabolismo (López Pamo, Aduvire y Baretino, 2002).

La eficiencia en la inmovilización de metales pesados en los sistemas de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca y el C.U. Shallap-Huapish-Toclla, se debe a la importancia de la sinergia entre las plantas, las bacterias y el sustrato como nutriente. Las bacterias sulfatorreductoras producen H_2S que insolubilizan y precipitan los metales pesados en formas de sulfuros metálicos. Estos contaminantes luego son adsorbidos y absorbidos por las plantas (Cabrera Revuelta, 2005). En los procesos de fitodegradación, las plantas y los microorganismos asociados degradan los contaminantes orgánicos en productos inofensivos. En este proceso, las plantas producen enzimas que ayudan a catalizar la degradación hacia CO_2 y H_2O , y los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales (Delgadillo-López et al., 2011).

Bacterias Sulfatorreductoras

Las bacterias sulfatorreductoras (BSR) son microorganismos que se desarrollan en ambientes necesariamente anaerobios como es el caso de suelos y lodos de alcantarillados. Estas bacterias provenientes de varias familias y diferentes géneros poseen una característica importante que son capaces de movilizar metales pesados (Vicente, 2006). Los microorganismos usan como fuente alimenticia

Tabla 1. Sustratos de los dos sistemas de biorremediación.

Sustratos	Sistema de la C. C. Cordillera Blanca	Sistema del C. U. Shallap-Huapish-Toclla
Arena gruesa	5 cm	3 cm
Mezcla de turba	3 cm	10 cm
Arena gruesa	5 cm	15 cm
Grava	-	10cm

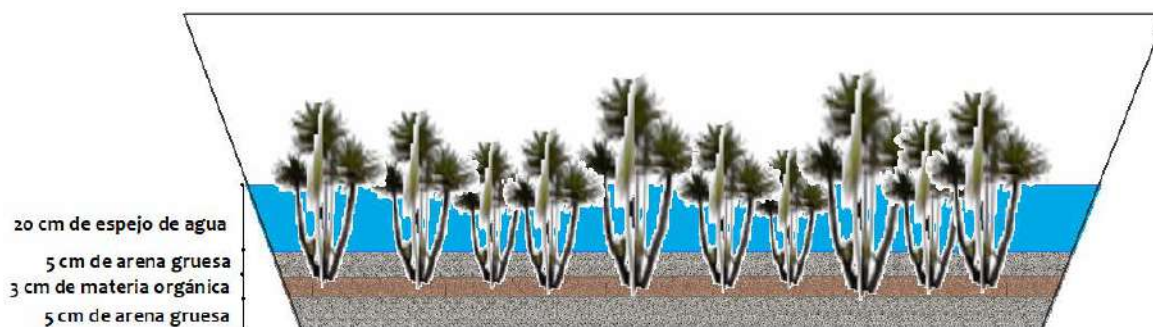


Figura 17. Sustratos del sistema de la C.C. Cordillera Blanca.

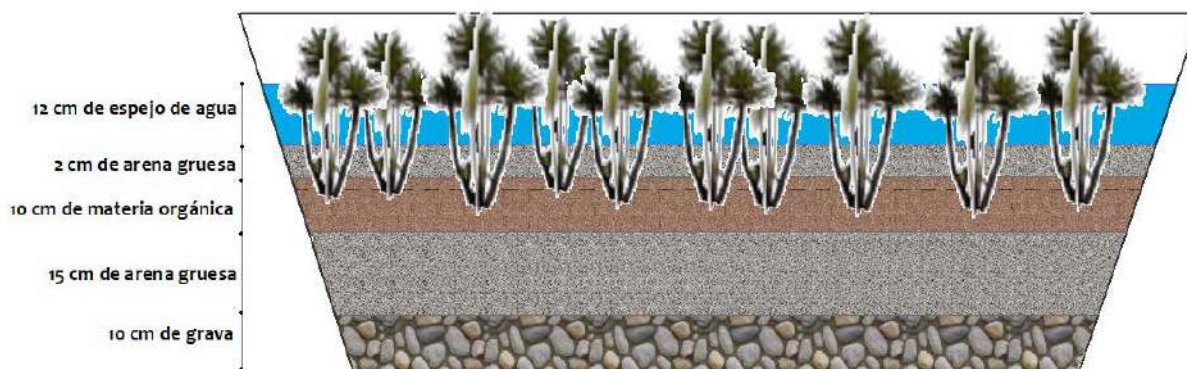


Figura 18. Sustratos del sistema del C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

parte o todos los metabolitos desechados por las raíces de las plantas. Otro fenómeno importante es el relacionado con la atracción electrostática entre las raíces de las plantas y las partículas coloidales suspendidas, las cuales se adhieren a la superficie de la raíz y posteriormente son absorbidas y asimiladas por las plantas y los microorganismos (Nuñez López et al., 2004). En ambos casos, las comunidades inocularon bacterias a sus experimentos.

En el caso del sistema de la C.C. Cordillera Blanca, el CIAL trabajó de la mano con el Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM para la obtención de una comunidad de BSR. Estas bacterias fueron inoculadas en la capa del sustrato de arena de los humedales, la cual se encuentra a mayor profundidad y, por ende, presenta menor porcentaje de oxígeno. Una vez inoculadas las bacterias, se humedeció el sustrato hasta su saturación para brindar a las bacterias condiciones adecuadas de humedad (Andrade Tovar, 2010).

En el sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla, se utilizaron BSR cultivadas en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM. La toma de muestras fue colectada de áreas contaminadas por descarga de aguas residuales en el río Santa (221775 E; 8945307 N), Región Ancash. Se recolectaron las muestras de lodo y agua de la misma área, manteniendo los envases de plástico llenos hasta el tope para evitar el ingreso de aire. Al ser bacterias anaerobias no pueden estar expuestas a altos niveles de oxígeno (Constanza Corrales et al., 2015). Las comunidades de BSR fueron cultivadas en medio mineral Postgate B (Tabla 2 y Figura 19). Para la determinación cualitativa de la presencia y actividad de las BSR en el medio de cultivo, se examinó la formación de precipitados de color negro en el medio mineral. La inoculación de estas bacterias a las celdas de humedales en el sistema de Shallap-Huapish-Toclla se realizó entre la capa de arena gruesa y la capa orgánica, muy cerca de las raíces de las plantas.

Esta técnica propició la adhesión de estas bacterias a la superficie de las raíces.

Tabla 2. Composición del medio de cultivo Postgate B para las BSR (Postgate, 1965).

COMPUESTO	CANTIDAD
KH ₂ PO ₄	0.5 g
NH ₄ Cl	1 g
CaSO ₄	1 g
MgSO ₄ · 7H ₂ O	2 g
Lactato de sodio	3.5 g
Extracto de levadura	1 g
FeSO ₄	0.5 g
Ácido ascórbico	0.1 g
Ácido tioglicólico	0.1 g
Agua destilada	1 litro
pH	7 – 7.5

Especies Vegetativas

La vegetación estimula los procesos microbianos del retiro del metal en el tratamiento de DAR (Gamonal Pajares, 2011). La selección de plantas es una etapa importante. Tienen que ser elegidas considerando su capacidad de tolerar las condiciones del DAR y absorber los metales tóxicos presentes (Villanueva Álvarez y Sánchez Pinto, 2013). En los humedales naturales y artificiales en el departamento de Ancash, en las provincias de las Cordilleras Negra y Blanca, entre los 2800 y 4200 msnm, se han identificado un total de 44 especies fitorremediadoras, entre las cuales destacan miembros de las familias Poaceae (*Agrostis*, *Alopecurus*, *Anthoxanthum*, *Calamagrostis*, *Dissanthelium*, *Festuca*, *Hierochloa*, *Poa*, *Polypogon*, *Vulpia*), Cyperaceae (*Carex*, *Cyperus*, *Eleocharis*, *Oreobolus*, *Scirpus*), Juncaceae (*Distichia*, *Juncus*, *Luzula*) y Plantaginaceae (*Plantago*) (Palomino, Paredes y Villanueva, 2005).

En el caso de ambos sistemas de biorremediación, se utilizaron especies altoandinas que han sido extraídas de ambientes extremos pertenecientes a

Drenaje Ácido de Mina (DAM). En la localidad de Huancapeti (221548 E; 8920526 N), se recolectaron las especies *Calamagrostis ligulata* y *C. ovata*, y en el área del pasivo minero de Mesapata (234270 E; 8917833 N), se recolectaron las especies de *Juncus arcticus*, *J. bufonius*, y *Distichia* sp.

En el sistema implementado por la C.C. Cordillera Blanca en Canrey Chico, se utilizó solamente la especie *Juncus arcticus*. Se realizó un trasplante directo para reducir el estrés generado a los individuos. Las plantas se recolectaron con una altura media de 0.4 m y se plantaron en las celdas de los humedales hasta obtener una densidad aproximada de 150 plantas por metro cuadrado. En cambio, en el caso del humedal artificial del sistema de Shallap-Huapish-Toella, se usaron varias especies vegetativas para mejorar el sistema desarrollado en la C.C. Cordillera Blanca. Después de una revisión bibliográfica y la identificación de los metales presentes en el agua (Fe, Mn, Al, Zn), se seleccionaron cinco especies principales para la construcción del humedal artificial: *Calamagrostis ligulata*, *C. ovata*, *Juncus arcticus*, *J. bufonius* L. y *Distichia* sp. Estas especies tienen altas capacidades de tolerancia e hiperacumulación de metales pesados por absorción, y se encuentran también usadas en tratamientos de DAM en humedales construidos (Ñáñez Alcántara, 2016).

Se realizó un trasplante directo de las especies *Juncus arcticus*, *J. bufonius* y *Distichia* sp, y, además, se propagaron las cinco especies *Calamagrostis ligulata*, *C. ovata*, *Juncus arcticus*, *J. bufonius*, y *Distichia* sp. en un vivero artesanal ubicado a los 3100 msnm en la ciudad de Huaraz. La etapa de propagación se realizó desde fines de diciembre del 2016 hasta julio del 2017. Como sustrato se utilizó turba y arena provenientes del Centro Experimental Ecológico Tuyu Ruri de la UNASAM en proporción 4:1 para mantener un drenaje y un desarrollo adecuado



Figura 19. Siembra de las BSR en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM para el sistema de biorremediación de Shallap-Huapish-Toella, abril 2017. Fotos: C. Alegre Oropeza.

de las raíces (Roberts y Robinson, 2010). Se utilizaron bandejas de 4.5 cm de ancho x 4.5 de largo x 15 cm de altura hechas de material PVC para las especies *Juncus arcticus* y *Distichia* sp. Para la especie *J. bufonius*, se usaron bandejas de 5.0 x 5.0 x 8.0 cm, y en el caso de *Calamagrostis ovata* y *C. ligulata*, se realizó la propagación en macetas de PVC de 15 cm de diámetro y 11.2 cm de profundidad, con un volumen correspondiente de 1.25 litros. Se mantuvo un control de temperatura y humedad con un sensor electrónico comercial a lo largo de toda la etapa de propagación. El método de propagación utilizado fue la división de raíces. La selección para la propagación se realizó cuidadosamente y de manera suave, dividiendo la masa de raíces en cuantas secciones se deseaba (Roberts y Robinson, 2010; Figura 20).

Luego de seis meses de propagación, las plantas fueron seleccionadas por especie y tamaño, teniendo en consideración el estrés que podrían sufrir por el

traslado y la fase de adaptación al nuevo ámbito. Las especies del vivero fueron trasplantadas al humedal artificial de Shallap-Huapish-Toclla en julio del 2017 (Figura 21). El mismo día, se realizó el trasplante directo de las especies recolectadas en Mesapata. La extracción y la siembra se realizaron con la participación de la población local.

El sistema de biorremediación en la C.C. Cordillera Blanca empezó a operar el año 2015 y se recuperaron 40 hectáreas del sistema de riego previamente abandonadas del canal Chonta (Cavassa et al., 2017). Sin embargo, en los dos últimos años de uso del sistema, se ha notado una saturación de los sedimentadores y humedales, por lo que el monitoreo y el mantenimiento del sistema se han convertido en los retos primordiales de investigación para la sostenibilidad del sistema. El sistema de Shallap-Huapish-Toclla está programado para operar en 2018 debido a que los comuneros decidieron construir dos



Figura 20. Propagación de las especies vegetativas en el vivero en Huaraz, diciembre 2017. Fotos: C. Alegre Oropeza.



Figura 21. Recolección y plantación de la *Juncus arcticus*, *J. bufonius* y *Distichia* sp. en el sistema de biorremediación de Shallap-Huapish-Toclla, julio 2017. Fotos: C. Alegre Oropeza.

reservorios para el almacenamiento del agua tratada: Rucuswain y Yacucochana, y sus respectivos canales de conducción. Por ello, el sistema de biorremediación se activará cuando se culmine la construcción de los reservorios. Ocho meses después del trasplante, se puede observar una muy buena adaptación de la totalidad de las especies. Durante una salida de identificación de especies vegetales, se ha notado la presencia y multiplicación en campo de las siguientes especies: *Calamagrostis ligulata*, *C. ovata*, *Juncus bufonius* y *J. arcticus*, además de nuevas especies no trasplantadas que colonizaron las celdas. Entre otras, se observó los géneros *Senecio* y *Trifolium*. Las celdas se regaron durante la temporada de estiaje, sin embargo, asumimos que la concentración de las comunidades bacterianas ha disminuido desde su inoculación. Las BSR de acuerdo con sus necesidades tienen que estar en contacto permanente con el agua y protegidas de factores ambientales tóxicos (oxígeno, luz, radiación ultravioleta y desecación).

Conclusiones

El presente artículo contribuye a resolver el tratamiento de la presencia de metales en el agua en los sistemas de riego y agua potable en zonas altoandinas en niveles perjudiciales a la salud humana y la producción de alimentos. Este es un problema amplificado por el retroceso de glaciares y el subsecuente incremento del drenaje ácido de rocas. El valor de esta experiencia en dos poblados andinos de Ancash reside en que describe enfoques y procesos que facilitan la inclusión de los usuarios locales del agua de riego en la identificación del problema de calidad de agua, su investigación y la cooperación con investigadores externos en diversos aspectos técnicos de los sistemas de biorremediación puestos a prueba.

La metodología participativa empleada durante las dos investigaciones campesinas en el desarrollo de soluciones a problemas de calidad de agua permite compartir algunos alcances que consideramos importantes.

En el caso de la C.C. Cordillera Blanca, los miembros del CIAL y comuneros aseguran un mejoramiento en la producción de los pastos cultivados usando el agua del sistema de biorremediación. Los sistemas de biorremediación son procesos que requieren consolidar capacidades locales de investigación, acción y reflexión para tratar de manera continua el mejor manejo de estos sistemas.

La participación activa de los usuarios mejora el diseño técnico del sistema y facilita el tratamiento de aspectos de organización social relacionados al uso de recursos de uso común.

En el caso de la experiencia del C.U. Shallap-Huapish-Toclla, la complejidad de los aspectos sociales de manejo de los sistemas de biorremediación recién se está entendiendo y necesita ser explorada más en profundidad. Un área importante de investigación en el desarrollo de tecnologías de biorremediación será la observación del manejo colectivo del sistema (mantenimiento, limpieza de sedimentos, disposición de sedimentos).

Cabe resaltar la importancia y el potencial de la investigación campesina para generar soluciones apropiadas a cada contexto y promover el diálogo con especialistas de una manera horizontal. Ambas comunidades participaron del diseño e implementación de sus respectivos sistemas de biorremediación. El empoderamiento de los usuarios a través de la investigación participativa y de métodos que faciliten que la población exprese sus puntos de vista de manera abierta y horizontal ante los técnicos es clave para lograr innovaciones tecnológicas sostenibles. Este enfoque y estos métodos mejoran las capacidades de las familias campesinas de valorar sus propios saberes, de compartirlos y de influir en el diseño de las soluciones. De igual forma, este enfoque permite a las familias del campo recibir y procesar información técnica de origen externo como, por ejemplo, la importancia de la función que cumplen los ecosistemas altoandinos, las metodologías científicas para la evaluación y monitoreo de sus sistemas con parámetros de campo que ellos mismo miden, o el rol de la inoculación de BSR.

La adaptación al cambio climático y la innovación tecnológica requieren procesos abiertos de adaptación continua. El fortalecimiento de grupos de investigadores campesinos es una estrategia que puede contribuir a esta necesidad de adaptación continua, siendo evidente que estos investigadores lograron tratar problemas emergentes asociados al cambio climático para los cuales no hay aún evidencia acumulada. De igual forma, el fortalecimiento de estos grupos, a partir de esta experiencia de biorremediación, tiene potencial para mejorar la gestión de recursos de uso común (como el agua) facilitando información, monitoreo y sistemas de control.

Finalmente, al ser parte de todas las actividades realizadas, las comunidades se han apropiado estos proyectos y tienen por tanto la experiencia y el conocimiento necesarios para replicarlos en otras comunidades funcionando como agentes locales de extensión agraria.

Agradecimientos

Agradecemos a la C.C. Cordillera Blanca y al C.U. Shallap-Huapish-Toclla por el trabajo de investigación campesina, las faenas comunales y su intercambio de conocimiento con la comunidad científica. Gracias al Laboratorio de Calidad Ambiental de la UNASAM, a E. J. Palomino Cadenas y a Raúl Loayza Muro por sus colaboraciones en los análisis de laboratorio y en los diseños de los sistemas de biorremediación. Gracias a Víctor Garro, quien trabajó de la mano con la C.C. Cordillera Blanca en el marco de su tesis. Finalmente, agradecemos a todo el equipo del Instituto de Montaña, quien participó en el desarrollo de estas dos investigaciones campesinas, especialmente a Doris Chávez, quien facilitó el proceso con la C.C. Cordillera Blanca y a Beatriz Fuentealba, quien realizó una revisión minuciosa del artículo. Este estudio es parte de los proyectos “Punas y Agua” y “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en las Montañas”, implementados por el Instituto de Montaña y financiados por la Fundación McKnight y USAID.

Referencias

- Andrade Tovar, V. S. (2010). *Evaluación del potencial de generación de sulfuro por la acción de las bacterias sulfato reductoras y sus posibles aplicaciones en el tratamiento de los drenajes ácidos de mina*. Tesis de ingeniería química. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.
- Ashby, J., Quirós, C. A. y Roa, J. I. (2009). Comité de investigación agrícola local. Catálogo de Metodologías Participativas. La Paz, Alianza Cambio Andino. Disponible en: [http://www.cambioandino.org/crearpdf.php?url=http://www.cambioandino.org/simet.shtml?s=p\(amp\)cmd\(195\)=c-1-2729](http://www.cambioandino.org/crearpdf.php?url=http://www.cambioandino.org/simet.shtml?s=p(amp)cmd(195)=c-1-2729)
- Baraër, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Huh, K.-I., Portocarrero, C., Gómez, J. y S. Rathay (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150. doi:10.3189/2012JoG11J186
- Bedón López, J. (2012). *Mejoramiento, ampliación del sistema de riego Shallap-Huapish-Toclla, en el distrito de Huaraz, provincia de Huaraz - Ancash*. Memoria descriptiva. Huaraz, Programa Subsectorial de Irrigaciones, Ministerio de Agricultura.
- Cabrera Revuelta, G. (2005). *Estudio de procesos para la solubilización y precipitación de iones metálicos contaminantes mediante bacterias azufre-oxidantes y sulfato-reductoras*. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz, España.
- Cavassa, A., Castro, C. y Rojas, J. (2017). *Evaluación final del proyecto de acuerdo cooperativo TMI-USAID: Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña*. Informe de consultoría. Huaraz, Instituto de Montaña/USAID.
- Chin, L. (2007). *Investigations into lead (Pb) accumulation in *Symphytum officinale* L.: A phytoremediation study*. Tesis doctoral. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. Obtenido de UC Reasearch Repository: <http://hdl.handle.net/10092/2592>
- Chisolm, R. (2016). *Estudio de balance hídrico para el canal Shallap-Huapish-Toclla*. Informe técnico elaborado por The University of Texas at Austin para el proyecto cooperativo de The Mountain Institute - USAID “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña”. Huaraz, Instituto de Montaña.
- Constanza Corrales, L., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A. y Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(23), 55-81.
- Da Silveira, A. N., Silva, R. y Rubio, J. (2009). Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil: Comparative active processes and water reuse. *International Journal of Mineral Processing*, 93(2), 103–109. doi:10.1016/j.minpro.2009.06.005
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R. y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una

- alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597-612.
- Fortner, S. K., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., Trierweiler, A., Baraër, M.,... Munk, L. (2011). Elevated stream trace and minor element concentrations in the foreland of receding tropical glaciers. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1792-1801.
- Gamonal Pajares, P. (2011). *Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos*. Delft, IHE Delft Institute for Water Education.
- Garro, V. (2015). *Eficiencia de un humedal artificial de tres celdas para el tratamiento de drenaje ácido de roca en el canal de Chonta-Canrey Chico - Recuay, Ancash. Período: octubre 2014 - abril 2015*. Huaraz, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Garzón, J. M., Rodríguez-Miranda, J. P. y Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309-318. doi:10.22267/rus.171902.93
- Greenwood, D. J. y Levin, M. (1998). *An introduction to action research: Social research for social change*. Thousand Oaks, California, Sage Publications.
- INGEMMET. (2011). *Informe Geoeconómico de la Región Ancash*. [Preparado por Rodríguez, I., Villarreal, E., Acosta, J. y Chirif, H.] Lima, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1-4), 93-103.
- Kaser, G., Ames, A. y Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136-140.
- Loayza Muro, 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 de la serie "Notas Técnicas sobre el Cambio Climático". Lima, Ministerio del Medio Ambiente (MINAM).
- Loayza-Muro R. A., Duivenvoorden J. F., Kraak, M. H. S. u Admiraal, W. (2014). Metal leaching, acidity, and altitude confine benthic macroinvertebrate community composition in Andean streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(2), 404-411. doi:10.1002/etc.2436
- López Pamo, E., Aduvire, O. y Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113(1), 3-21.
- Mark, B. G. y McKenzie, J. M. (2007). Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water. *Environmental Science & Technology*, 41(20), 6955-6960. doi:10.1021/es071099d
- Mark, B. G., Bury, J., McKenzie, J. M., French, A. y Baraër, M. (2010). Climate change and tropical Andean glacier recession: Evaluating hydrologic changes and livelihood vulnerability in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 794-805.
- Moses, C. O., Nordstrom, D. K., Herman, J. S. y Mills, A. L. (1987). Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6), 1561-1571. doi:10.1016/0016-7037(87)90337-1
- Ñáñez Alcántara, D. A. (2016). *Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Ancash, Perú)*. Tesis de bachiller. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Universidad Cayetano Heredia, Lima.
- Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R. y Olgúin, E. J. (2004). Fitorremediación: Fundamentos y aplicaciones. *Ciencia*, 55(3), 69-82.
- Ostrom, E. (2000). *El gobierno de los bienes comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva*. México, UNAM-CRIM-FCE.
- Palomino Cadenas, E. J. (2007). *Sistemas de humedales para la biorremediación de drenajes ácidos de mina o roca en Ancash-Perú*. Tesis doctoral. Universidad de Trujillo, Perú.
- Palomino, E., Paredes, M. y Villanueva, A. (2005). Biorremediación de drenajes ácidos de mina

- (DAM) mediante sistema de humedales. *Libro de resúmenes del IV Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería y Metalurgia*, 32. Lima.
- Postgate, J. R. (1965). Recent advances in the study of the sulfate-reducing bacteria. *Bacteriological Reviews*, 29(4), 425-441.
- Quesquén Rumiche, A. (2007). *Propuesta de asignación de agua superficial en bloques (volúmenes anuales y mensuales) para la formalización de los derechos de uso de agua en la cuenca alta del río Santa – microcuencas Casca y Monterrey*. Lima, PROFODUA (Programa de Formalización de Derechos de Usos de Agua – FASE II), IRH-INRENA (Intendencia de Recursos Hídricos, Instituto Nacional de Recursos Naturales).
- Rabatel, A. (2005). *Chronologie et interprétation paléoclimatique des fluctuations des glaciers dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du Petit Age Glaciaire (17ème siècle)*. Tesis doctoral. Université Joseph Fourier / Grenoble I, Francia.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L.,... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, 81-102. doi:10.5194/tc-7-81-2013
- Rascio, N. y Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169-181. doi:10.1016/j.plantsci.2010.08.016
- Roberts, A. y Robinson, M. L. (2010). La propagación de las plantas de interior. Cooperative Extension, 99-60 (2 págs.). Reno, Nevada, University of Nevada. <https://www.unce.unr.edu/publications/files/sl/other/FS9960.pdf>
- Sheoran, A. S. y Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19(2), 105–116. doi:10.1016/j.mineng.2005.08.006
- 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. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012
- Todd, A. S., McKnight, D. M., Jaros, C. L. y Marchitto, T. M. (2007). Effects of acid rock drainage on stocked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): An *in-situ*, caged fish experiment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1-3), 111-127. doi:10.1007/s10661-006-9382-7
- UGRH. (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- University of Amsterdam. (2012 – informes inéditos). (1) Driessen, C., Reijman, T. y Tel, T. - Distribution of abiotic factors in Canrey Chico and their relationship to vegetation. (2) Bösken, J. y Van der Meulen, M. - Hydrochemical assessment of the Canrey Chico catchment in the Cordillera Blanca. (3) de Graaf, L. y van Hall, R. L. - The use of soils as a natural buffer for the contaminated waters in the río Negro catchment, Cordillera Blanca, Peru. (4) Stroo, J. I. L. - Postglacial soil development on deglaciated features in the Canrey Chico catchment.
- Vicente, M. S. (2006). *Uso de bacterias sulfato-reductoras inmovilizadas para la precipitación de metales pesados*. Trabajo final de Laboratorio de Procesos Biotecnológicos. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires.
- Villanueva Álvarez, R. C. y Sánchez Pinto, F. R. (2013). *Diseño de tratamiento pasivo después del plan de cierre de mina*. Tesis de Ingeniero Sanitario. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Vuori, K.-M. (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici*, 32(3), 317-329.
- Zapata, F. y Rondán, V. (2016). *La investigación acción participativa: Guía conceptual y metodológica del Instituto de Montaña*. Lima, Instituto de Montaña.

Recuperación de Servicios Ecosistémicos de Áreas Afectadas por el Aluvión de 2012 en la Microcuenca Santa Cruz, Huaylas, Ancash

Recovery of Ecosystem Services from Areas Affected by the 2012 Flood in the Santa Cruz Microbasin, Huaylas, Ancash

Ana Marlene Rosario Guerrero¹

¹*Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Huaraz, Ancash*

Resumen

Los ecosistemas de montaña son espacios de gran importancia para la humanidad por los servicios ecosistémicos que proveen y, a la vez, son vulnerables y frágiles frente al cambio climático. La Cordillera Blanca, ubicada en el departamento de Ancash, es representativa de este contexto. En 2012, la microcuenca Santa Cruz, ubicada en esta cordillera, fue afectada por un aluvión debido a la sobresaturación del dique morrénico de la laguna Artizón Bajo. Este aluvión afectó los medios de vida de la población aguas abajo. Los servicios principales, como agua para consumo humano y actividades económicas, fueron rehabilitados inmediatamente. Sin embargo, se perdieron 236 ha de ecosistemas importantes de la microcuenca. Esta pérdida ha influido en la calidad de servicios ecosistémicos de regulación hídrica debido a la alteración de la calidad de agua, en los servicios ecosistémicos culturales debido a la reducción de la calidad paisajística de la microcuenca, y en el servicio de provisión de alimento para ganado. Estas áreas necesitan ser recuperadas y, para ello, el INAIGEM, con participación de la población local, ha desarrollado acciones para generar procesos sociales y técnicos hacia la recuperación de los servicios afectados. En esta fase inicial, se han instalado dos parcelas representativas de 15 y 20 ha para investigar procesos ambientales y sociales de recuperación y conservación de los ecosistemas y contribuir con la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos.

Palabras clave: *Recuperación, servicios ecosistémicos, microcuenca Santa Cruz*

Abstract

Mountain ecosystems are spaces of great importance for humanity because of the ecosystem services they provide and, at the same time, they are vulnerable and fragile in the face of climate change. The Cordillera Blanca, located in the department of Ancash, is representative of this context. In 2012,

the Santa Cruz microbasin, located in this mountain range, was affected by a flood due to over-saturation of the moraine dam of Lake Artizón Bajo. This flood affected the livelihoods of the downstream population. The main services, such as water for human consumption and economic activities, were immediately rehabilitated. However, 236 ha of important ecosystems of the microbasin were lost. This loss has influenced the quality of ecosystem services for water regulation due to the alteration of water quality, in cultural ecosystem services due to the reduction of the landscape quality of the microbasin, and in the provision of food for livestock. These areas need to be recovered and, for this, INAIGEM, with the participation of the local population, has developed actions to generate social and technical processes towards the recovery of the affected services. In this initial phase, two representative plots of 15 and 20 ha have been installed to investigate environmental and social processes of recovery and conservation of ecosystems and contribute to the sustainability of ecosystem services.

Keywords: *Recovery, ecosystemic services, Santa Cruz microbasin*

Introducción

Las montañas son el hogar de una décima parte de la población mundial, más de la mitad de la humanidad depende de ellas. Las montañas se volverán más peligrosas conforme aumentan en cantidad e intensidad la erosión del suelo, los aludes de tierra y rocas, las inundaciones y las avalanchas (EIRD, 2002). Las montañas abarcan el 25% de la superficie terrestre del planeta, son como torres de agua y proveen este recurso a la mitad de la humanidad (Mountain Partnership, s/f). Son zonas de gran biodiversidad, albergan un gran porcentaje de la diversidad cultural y etnolingüística del mundo. Además, son centros de recreación y de turismo, que brindan beneficios económicos a los habitantes locales y a las economías nacionales (Egan y Price,

2014). La Cordillera Blanca forma parte de este territorio, y alberga la mayor extensión de glaciares tropicales afectados por el cambio climático. En este espacio se ubica la microcuenca Santa Cruz. A partir del año 1975, 340,000 ha de esta cordillera fueron declaradas como el Parque Nacional Huascarán.

Las montañas se encuentran entre las regiones más sensibles a los cambios climáticos. Sus glaciares y ecosistemas son indicadores fiables de este fenómeno (Egan y Price, 2014). En la escala de especies y comunidades vegetales, tres respuestas generales podrían ocurrir debido a las anomalías climáticas: desplazamiento, adaptación -ya sea en términos de cambios evolutivos como adaptaciones fisiológico (Cuesta et al., 2012)- o reducción de áreas significativas de ecosistemas por eventos geodinámicos como los aluviones. De igual manera, los grandes problemas transversales del Parque Nacional Huascarán lo constituyen: el cambio climático (desglaciación, gestión del agua), el desarrollo turístico, el sobrepastoreo, la fragmentación del hábitat que genera la pérdida de la diversidad biológica y la provisión de los servicios ecosistémicos que estos ambientes generan a la sociedad local y regional.

En la microcuenca Santa Cruz de la Cordillera Blanca, el 8 de febrero de 2012, debido a la sobresaturación del dique morrénico de la Laguna Artizón Bajo se produjo el desborde de un volumen aproximado de 254,136 m³ de agua. El flujo de material llegó a la laguna Jatuncocha, donde se disipó la energía y volumen del aluvión (UGRH, 2012). Los efectos producidos en los medios de vida de la población aguas abajo fueron: la destrucción de bocatomas, tramos de canales de regadío, bocatomas de agua potable y bocatoma de centrales hidroeléctricas; afectación de terrenos de cultivos y pastos; no se registraron pérdidas de vidas humanas. El informe del especialista del Parque Nacional Huascarán inicialmente reportó la pérdida de 1.5 a 2 ha del paraje Taullipampa, la totalidad del bofedal de la cabecera de Jatuncocha, destrucción de rodales de Quishuar y destrucción del 70% del sendero desde Cashapampa hasta la compuerta de la Laguna Jatuncocha (Salvador, 2012). Sin embargo, a lo largo de la microcuenca Santa Cruz, en una superficie de 236 ha, se extendió material aluviónico que colmató áreas importantes de bosques, praderas y humedales e hizo desaparecer la Laguna Ichicocha.

En forma inmediata, el Gobierno Regional de Ancash, las municipalidades de Huaylas y Santa Cruz, así como organizaciones locales, procedieron a la rehabilitación de los servicios de agua para consumo y riego, puentes y otros. Mediante Decreto Supremo N° 065 y 084 -2012-PCM del 9 de junio del 2012 se declara el Estado de Emergencia por 120 días en las cuencas de las lagunas Artizón Bajo y Jatuncocha por peligro inminente de aluvión, para que el Gobierno Regional de Ancash, los gobiernos locales involucrados, según corresponda, con la intervención del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI, el Ministerio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua, el Ministerio del Ambiente, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones y demás instituciones y organismos del Estado, dentro de sus competencias, así como las entidades privadas involucradas en cuanto les corresponda, ejecuten las acciones inmediatas y necesarias de respuesta y rehabilitación, para la reducción y minimización del alto riesgo existente en las zonas afectadas (Decreto Supremo N° 065-2012-PCM, 2012). Los servicios básicos y los sistemas de riego, así como caminos para el tránsito de turistas fueron rehabilitados.

Sin embargo, luego del aluvión, los principales servicios ecosistémicos anteriormente brindados están en un proceso lento de recuperación. Se ha registrado que las condiciones de calidad del agua muestran alteraciones, y han cambiado las condiciones paisajísticas. Frente a ello, se necesitan respuestas para la recuperación de los ecosistemas impulsadas por sectores gubernamentales.

Es imperativo abordar los riesgos en los ecosistemas, y una alternativa de adaptación que está ganando atención para enfrentar o paliar los efectos adversos de la variabilidad y el cambio climático es la Adaptación basada en Ecosistemas (AbE). Según la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2009), la AbE se refiere a la utilización de la biodiversidad y los servicios que brindan los ecosistemas como parte de una estrategia más amplia de adaptación, para ayudar a las personas a adaptarse a los efectos adversos del cambio climático. La AbE integra el manejo sostenible, la conservación y la restauración de ecosistemas para proveer servicios que permiten a las personas adaptarse. Como parte de esta estrategia general se incluyen diversas actividades para la gestión sostenible de los ecosistemas, tales como el manejo integrado del recurso hídrico para la regulación de flujos de agua, la restauración de

ecosistemas (humedales, bosques) para la reducción del riesgo de desastres (protección contra crecientes o inundaciones) y la diversificación de la producción agrícola para hacer frente a las condiciones climáticas cambiantes (adaptación de cultivos y ganados a la variabilidad climática) (PNUD et al., 2016).

Dentro de este marco, se busca determinar la influencia de factores socioambientales para la recuperación de los servicios ecosistémicos afectados por aluvión en la microcuenca Santa Cruz. Para ello, se estimará la alteración de la calidad de los servicios ecosistémicos generada en la microcuenca Santa Cruz, producto del aluvión de la laguna Artizón Bajo. De igual manera, se implementarán alternativas para la recuperación de ecosistemas en parcelas experimentales a fin de mejorar los servicios ecosistémicos de retención de agua y mejorar la calidad del agua en la microcuenca Santa Cruz. Y proponer alternativas técnicas-sociales para la recuperación de los servicios ecosistémicos de la microcuenca Santa Cruz.

La investigación planteada es descriptiva/explicativa. El periodo de desarrollo del presente trabajo fue durante los años 2016 y 2017. El proceso realizado fue la cuantificación de la variación de la cobertura de áreas afectadas por el aluvión mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite, previos y posteriores al aluvión. Estimación de impactos en los servicios ecosistémicos de provisión y soporte (calidad del agua, calidad del servicio turístico, áreas de pastoreo). Instalación de parcelas de investigación en áreas afectadas de la microcuenca

Santa Cruz, con el propósito de recuperar cobertura vegetal, suelo y agua. Así como la identificación de la percepción de la población a través de entrevistas.

Los servicios ecosistémicos alterados producto del aluvión son: provisión de agua en calidad, servicios de provisión de forraje proveniente de los pastos naturales y servicios culturales como el turismo por la calidad paisajística. Los procesos de reconstrucción posteriores a un desastre, establecidos por el Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres (SINAGERD) no indican lineamientos para la recuperación de ecosistemas estratégicos afectados por desastres como es el caso de aluviones. Las áreas piloto muestran opciones de acelerar la recuperación de ecosistemas mediante la investigación y se convierten en espacios de sensibilización, educación e incidencia política para llevar a mayor escala los resultados logrados.

Contexto del Estudio

La microcuenca Santa Cruz (141.3 km²), políticamente, pertenece al distrito de Santa Cruz, provincia de Huaylas, departamento de Ancash, Perú. Hidrográficamente, la microcuenca es parte de la subcuenca río Blanco (234.88 km²) y esta pertenece a la cuenca hidrográfica del río Santa (11,707.8 km²). La microcuenca abarca el 60% de la superficie de la subcuenca río Blanco. Este espacio geográfico está ubicado en el lado occidental de la Cordillera Blanca y forma parte del Parque Nacional Huascarán (Figura 1).

La Cordillera Blanca es una cordillera glaciar

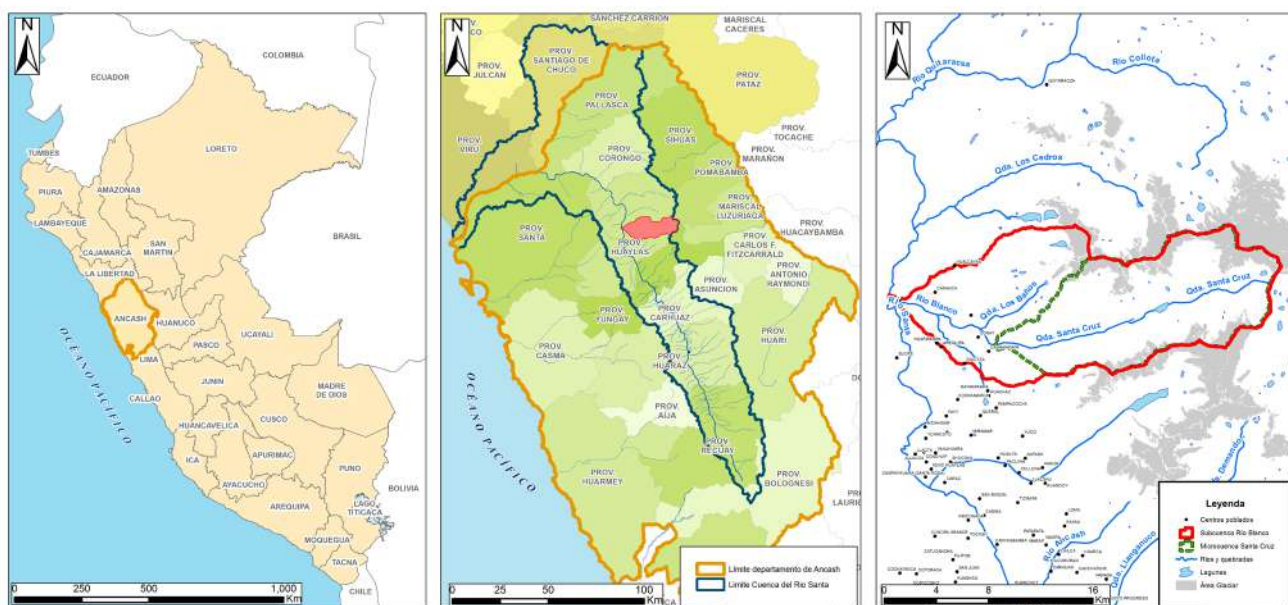


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la microcuenca Santa Cruz, Huaylas, Ancash.

de gran altura que se encuentra en una región tectónicamente inestable con alta probabilidad de sufrir sismos importantes (Sevink, 2009) y es la zona con más actividad geodinámica externa en Perú (Valderrama y Vilca, 2012). La acelerada fusión de los glaciares, la formación de lagunas peligrosas y la ocurrencia de avalanchas de hielo son de especial significación en materia de riesgos geológicos: en muchos casos, la incidencia directa de estas ha provocado desbordes y aluviones de diversas magnitudes (UGRH, s/f). La subcuenca río Blanco representa este contexto, debido a que en su territorio, entre 1970 y 2016, los glaciares han reducido su superficie en 39% (Figura 2). Los nevados más representativos son el Alpamayo, Taulliraju y Artesonraju. Existen 20 lagunas de diferentes dimensiones y las más representativas por su calidad paisajística son las lagunas Ichiccocha, Jatuncocha, Arhuaycocha y Taullicochoa.

La quebrada Santa Cruz es una de las quebradas con mayor extensión en el Parque Nacional Huascarán, con una longitud de 17 km aproximadamente. La altitud varía desde 2887 msnm hasta 4700 msnm. Es bastante accidentada y cerrada, creando condiciones climáticas de temperatura favorables debido a los vientos que suben desde las partes bajas de las campiñas (INAIGEM, 2016).

Aunque hay evidencias arqueológicas de terremotos e inundaciones en la época prehispánica (Wegner, 2014), el registro histórico de eventos extraordinarios ocurridos en el departamento de Ancash, como avalancha, aluviones y desbordes de la laguna datan de los años 1700. En Santa Cruz, el primer registro de incremento de agua en la cabecera de la quebrada fue en marzo de 1997, debido a la rotura del dique morrénico frontal de la laguna Artizón Bajo a consecuencia del derrumbe de la pared lateral derecha, próxima al área frontal. Este hecho generó una abertura de corte profundo en el dique y arrastró abundante material aluviónico que se depositó en las zonas conocidas como Taullipampa y Quishuarpampa. El impacto fue controlado por la laguna Jatuncocha (UGRH, 2001).

En la microcuenca Santa Cruz existen tres lagunas, Arhuaycocha, Cuchilla y Jatuncocha, que cuentan con obras de seguridad, aun así, según informes especializados, algunas siguen constituyendo un peligro.

La laguna Arhuaycocha no experimentó desbordes importantes, cuenta con obras civiles de seguridad construidas los años 1990 y 2000 (UGRH, 2001). En 2017, el INAIGEM reportó que la laguna continúa siendo un peligro latente, debido a diferentes factores como: presencia de glaciares colgantes, altas

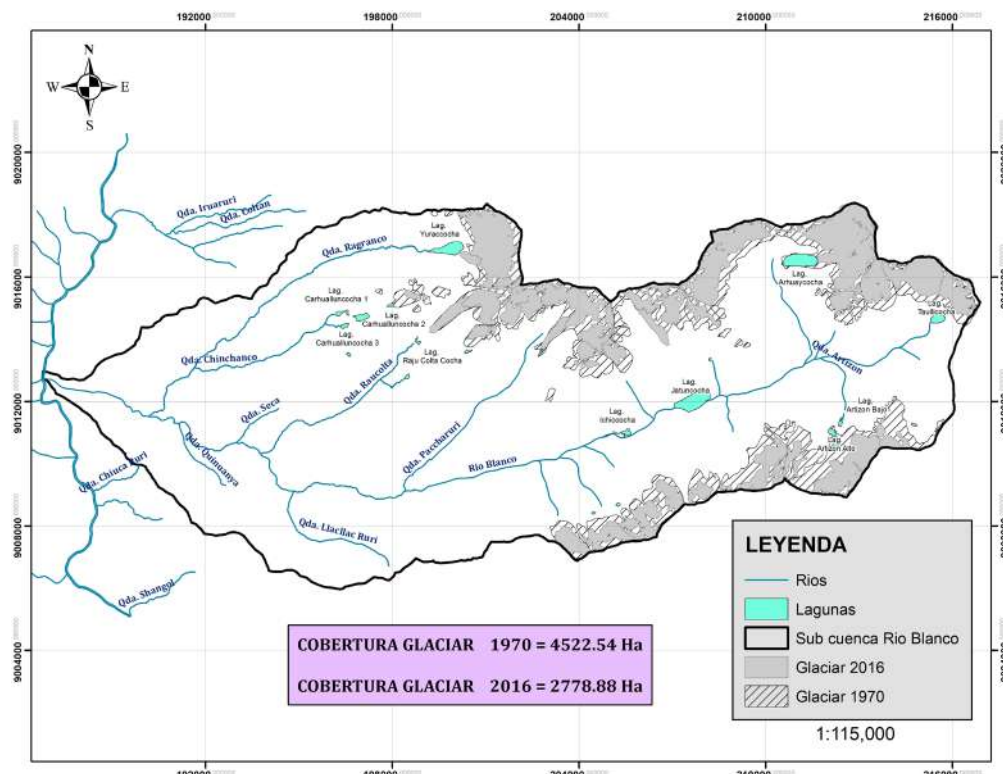


Figura 2. Red hidrográfica y superficie glaciar en 1970 y 2016 de la subcuenca río Blanco, Huaylas, Ancash.

pendientes de estos (Figura 3), morrenas laterales inestables, desprendimiento del glaciar que está en contacto con la laguna, estructura del canal y sus aletas de entrada deterioradas debido al tiempo y el uso (Figura 4) (INAIGEM, 2017).



Figura 3. Laguna Arhuaycocha en contacto con el glaciar con alta pendiente. Foto: INAIGEM.



Figura 4. Las aletas del canal en proceso de deterioro. Foto: INAIGEM.

La laguna Jatuncocha cuenta con obras civiles de desagüe y contención construidas en 1969, que constan de canal de ingreso de 42 m aproximadamente, un dique artificial de baja altura, dos conductos en paralelo de sección circular cubiertos por el dique artificial y un canal de salida de mampostería de piedra y concreto (UGRH, 2001). Durante el evento del 8 de febrero de 2012, la laguna disipó la energía del aluvión, y a consecuencia de ello se incrementaron sedimentos en el fondo del cuerpo de agua y el tramo final del canal de salida ha sido socavado (UGRH, 2012). Durante los dos eventos sucedidos en la microcuenca, la laguna ha cumplido una función de disipación de energía y retención del material aluviónico, de allí la importancia de su ubicación y la necesidad de su mantenimiento para que continúe con esta función.

Lagunas Artizón Alto y Artizón Bajo (Figuras 5 y 6) se ubican en la cabecera de la quebrada Artesón 1 y

alimentadas principalmente por el deshielo del frente glaciar Artesonraju. En 2001, el volumen era de 333,310 m³ y la profundidad máxima de 23 m (UGRH, 2005). Producto del aluvión, se estimó que el volumen descargado fue de aproximadamente 586,400 m³ (UGRH, 2012). El dique natural preexistente de la laguna Artizón Bajo fue desplazado y removido aguas abajo, situación que permitió que en la actualidad dicha laguna posea un nivel aparentemente bajo (Figura 6), por lo que no representa un peligro de consideración (INAIGEM, 2018).



Figura 5. Laguna Artizón Alto, marzo 2017. Foto: INAIGEM.



Figura 6. Laguna Artizón Bajo, subcuenca río Blanco, setiembre 2017. Foto: INAIGEM.

Estas lagunas tienen influencia directa en el fondo de valle de la microcuenca, por lo que su seguridad también representa seguridad para las poblaciones y los ecosistemas aguas abajo. Otro aspecto relevante de la microcuenca Santa Cruz es que es uno de los territorios con mayor diversidad biológica del Parque Nacional Huascarán y de mayor afluencia turística para el deporte de caminata en la Cordillera Blanca.

Por estas consideraciones, Santa Cruz es un ámbito especial para el análisis de los riesgos de origen glaciar, no solo desde el punto de vista de seguridad poblacional sino desde el punto de vista de la recuperación de los ecosistemas que en ella existen.

Tipos de Ecosistemas y Diversidad Biológica en la Subcuenca Río Blanco

Con base en el esquema presentado por World Wildlife Fund (Olson et al., 2001; Abell et al., 2008), y adaptado para Santa Cruz, en la microcuenca existen dos biomas terrestres: Pastizales y Matorrales Montanos y Aguas Dulces Montanos. Estos biomas y su correspondencia con las ecorregiones se muestran en la Tabla 1.

El Bioma **Terrestre de Pastizales y Matorrales Montanos** abarca los pastizales y matorrales de altura (montanos, subalpinos y alpinos). Incluye los pastos localizados sobre la línea de bosques conocidos como tundra alpina, y bosques subalpinos de árboles retorcidos con crecimiento lento, como son los del género *Polylepis*. El **Bioma de aguas dulces montañas**, incluye todo tipo de cuerpos de agua lacustres y fluviales propios de las zonas montañosas.

La característica principal es la presencia de corrientes relativamente someras y muy rápidas con altos gradientes, e incluye también humedales y lagos de alta altitud con condiciones climáticas montanas (Abell et al., 2008).

Para identificar los ecosistemas naturales en el Perú, se cuenta con el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal al año 2015, el cual constituye una herramienta inicial y describe los diversos tipos de cobertura vegetal (MINAM, 2016). Según este mapa, la subcuenca río Blanco presenta siete unidades de cobertura. El tipo y superficie por cada una de ellas se muestra en la Tabla 2 y la Figura 7.

Para mejorar la escala en la definición de las unidades de cobertura, y por consiguiente la definición de los ecosistemas, se realizó el análisis multiespectral de imágenes de satélite mediante el método de clasificación supervisada. Las imágenes

Tabla 1. Biomas y ecorregiones de la quebrada Santa Cruz (Santander, 2017).

Bioma	Ecorregión
Pastizales y Matorrales Montanos	Puna Central Andina Húmeda
Aguas Dulces Montanos	Altos Andes – Amazonas

Tabla 2. Cobertura vegetal de la microcuenca Santa Cruz. Fuente: Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (2015).

Cobertura Vegetal	Símbolo	Área (ha)	%
Agricultura andina	Agri	2867.5	12.2
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Esv	10,293.7	43.8
Bosque relicto altoandino	Br-al	266.7	1.1
Glaciar	Gla	4882.4	20.8
Lagunas, lagos y cocha	L/Co	122.9	0.5
Matorral arbustivo	Ma	1796.8	7.7
Pajonal andino	Pj	3256.2	13.9
TOTAL		23,486.2	100.0

Tabla 3. Cobertura vegetal de la microcuenca Santa Cruz a escala 1:25,000.

Cobertura Vegetal	Símbolo	Área (ha)	%
Agricultura andina	Agri	1 172.5	5.0
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Esv	4777.9	20.4
Bofedal	Bo	198.6	0.8
Bosque relicto altoandino	Br-al	654.5	2.8
Glaciar	Gla	3228.8	13.8
Lagunas, lagos y cocha	L/Co	181.9	0.8
Matorral arbustivo	Ma	885.3	3.8
Pajonal andino – Césped de puna	Pj	705.6	3.0
Pajonal andino – Pajonal	Pj	11,638.5	49.6
TOTAL		23,455.1	100.0

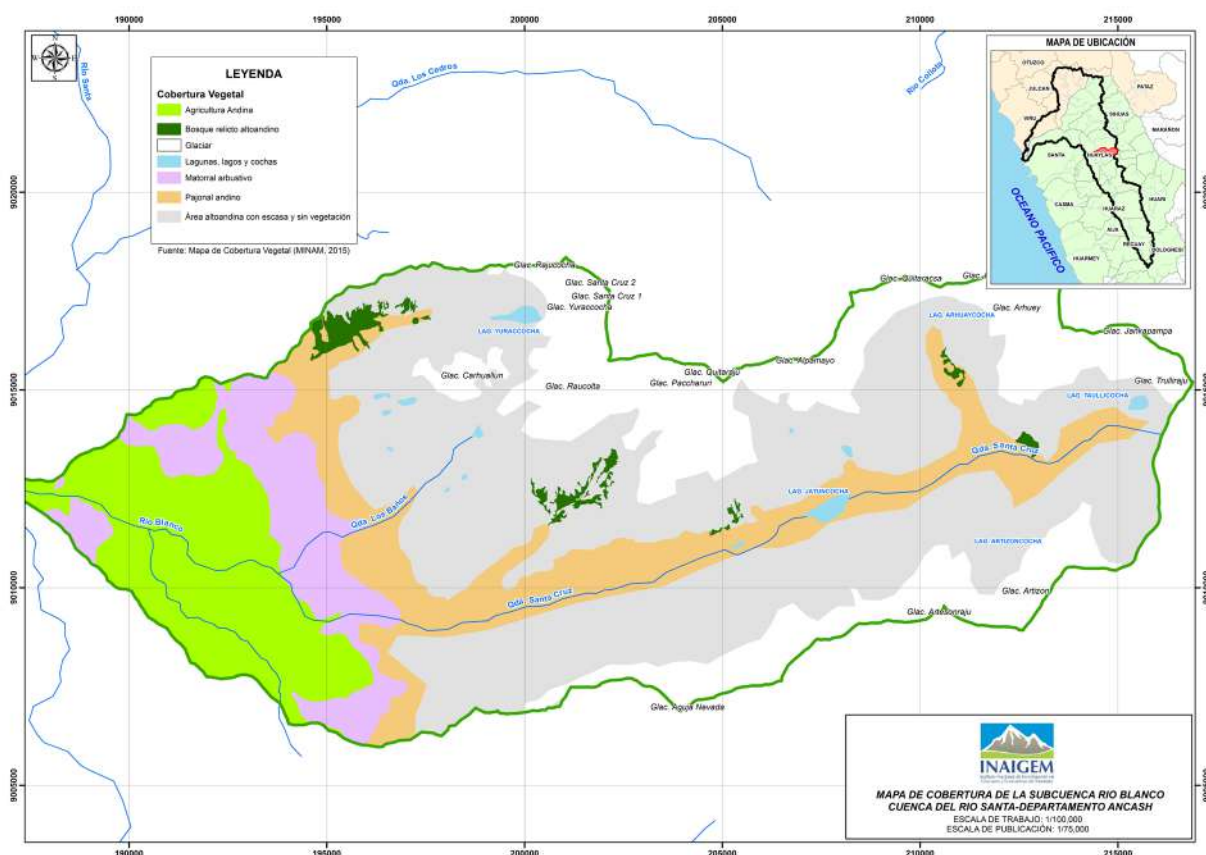


Figura 7. Cobertura vegetal de la microcuenca Santa Cruz. Fuente: Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (2015).



Figura 8. Árbol de quenual frondoso y con gran fuste, ubicado en el bosque de Arhuaycocha Foto: INAIGEM.

utilizadas han sido tipo Rapideye 3A, que cuentan con corrección geométrica de nivel 3A que utiliza puntos de control terrestre (GCP) y un modelo de elevación digital (DEM) STRM DTED para alcanzar la precisión geodésica absoluta. Las unidades de cobertura vegetal y las superficies determinadas se muestran en la Tabla 3 y la Figura 8.

Mediante trabajos de campo, el equipo técnico de la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) del INAIGEM ha determinado las características de cada ecosistema.

Bosque Relicto Altoandino (Br-al)

Distribuido a manera de pequeños parches, sobre terrenos de altas pendientes empinadas hasta escarpadas y casi inaccesibles. Hacia la parte baja de la subcuenca forma parte de la vegetación ribereña. Los bosques están distribuidos desde 2080 hasta 5060 msnm. Las especies representativas de este ecosistema son: “quenual”, de las siguientes especies: *Polylepis sericea*, *P. weberbaueri*; y además, el (quisuar) *Buddleja incana* y el (aliso) *Alnus acuminata* y otras géneros como *Bidens*, *Eccremocarpus*, *Bomarea*, *Baccharis* y *Mutisia*.

En la parte baja de la subcuenca predomina el *Alnus acuminata*. Su distribución es hasta 3800 msnm, siendo pocas las zonas donde se encuentra el aliso a esta altitud, debido a que es una especie que no soporta las heladas. A 4007 msnm hay presencia de bosques relictos de *Buddleja* sp. (quishuar), árboles de buen tamaño y refugio de aves, en especial el *Colaptes atricolles* (pájaro carpintero). A mayor altitud priman los bosques relictos de *Polylepis incana*, *Polylepis weberbaueri*, *Polylepis sericea* (quenual), árboles de buen porte y creciendo sobre rocas. Los bosques más representativos de quenual se encuentran en los sectores de Arhuaycocha (Figura 9) (18 L 210932 9015423) y de quisuar, en Quishuarpampa (18 L 211495 9013521).

Pajonal Andino (Pj) - Pajonal

Está conformado mayormente por herbazales gramínoideas (hierbas en forma de manojos de hasta 80 cm de alto) (MINAM, 2015). En la subcuenca, es la cobertura vegetal de mayor extensión. La distribución se da desde 2050 hasta 5550 msnm. Se desarrolla sobre terrenos que van desde casi planos hasta empinados o escarpados. Las especies características de este ecosistema son: *Stipa ichu* (ichu), *Deyeuxia ovata* (sora), *Agrostis* sp. L. (quecha

cachu), *Festuca* (rupu rupu), *Aristida adscensionis*, *Eragrostis nigricans*, *Anthochloha lepidula*, *Agrostis gélida*, *Calamagrostis rígida*, *Calamagrostis ovata*, *Calamagrostis mínima*, *Lolium* y *Opuntia floccosa*. Asociadas a otras especies de plantas como *Hypochaeris taraxacoides*, *Solanum* sp., *Azorella biloba*, *Ephedra rupestris*, *Baccharis caespitosa* var. *alpina*.

Pajonal Andino (Pj) - Césped de Puna

Esta unidad de cobertura vegetal está integrada por los céspedes, hierbas de porte bajo hasta de 15 cm de alto. El subtipo “césped” está dominado por gramíneas y gramínoideas, con inclusiones de especies en forma de cojines o almohadilladas (MINAM, 2015). En la subcuenca, se distribuyen desde 2050 hasta 5550 msnm. Son especies representativas las especies: *Calamagrostis rígida*, *C. ovata*, *C. mínima*, *Lolium*, *Opuntia floccosa* y *Weneria nubifena*.

Bofedal (Bo)

Este humedal altoandino se encuentra ubicado en el fondo de valle fluvio-glaciar. Se distribuyen desde 2280 hasta 4730 msnm. Se alimentan del agua proveniente del deshielo del circo glaciar de

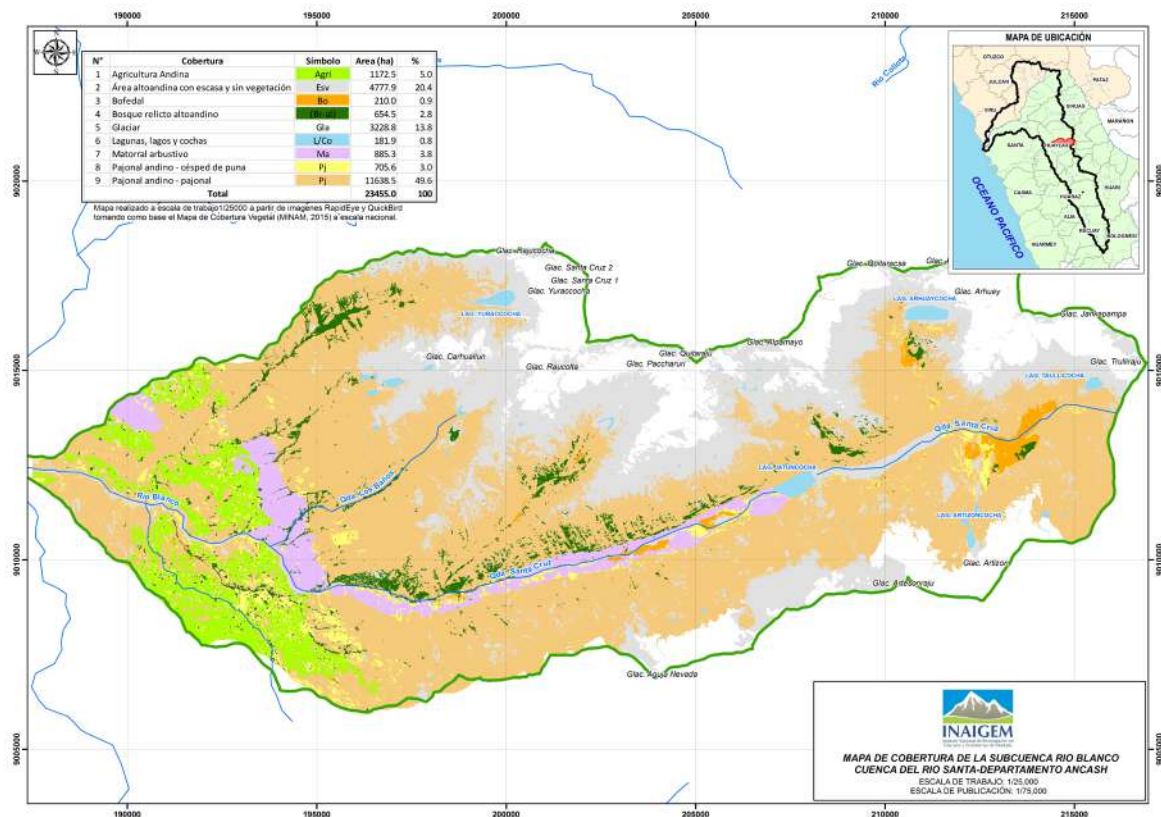


Figura 9. Cobertura vegetal de la microcuenca Santa Cruz a escala 1:25,000.

la quebrada, del afloramiento de agua subterr3nea y de la precipitaci3n pluvial. Se caracterizan por la presencia constante de agua. Este ecosistema, que sirve como forraje principalmente para el ganado vacuno (Figura 10), est3 mayormente constituido por estas especies caracter3sticas: *Distichia muscoides*, *Oxychloe andina*, *Plantago r3gida*, *Plantago tubulosa*, *Myrosmodes palusdum*, *Gentianella dolichopoda*, *Astragalus* sp., *Alchemilla bipinnatifida* y *Lucioclina*.



Figura 10. Bofedales de la cabecera de la microcuenca Santa Cruz. Foto: INAIGEM.

Matorral Arbustivo (Ma)

Este tipo de cobertura vegetal se encuentra distribuido desde 2530 hasta 5252 msnm. Este ecosistema se observa en el entorno a la laguna Jatuncocha. En estos espacios existen condiciones de humedad y menores valores de temperatura, lo que propicia el desarrollo de una mayor diversidad de especies arbustivas, entre las que se mencionan las siguientes: *Lupinus balianus* (chocho), *Baccharis tricuneata* (tayanco), *Parastrephya lepidopylla* (tola), *Diplostephyum* sp., *Dunalia espinosa*, *Hesperomeles* sp. (manzanita), *Brachiotun* sp., *Tibouchina* sp., *Aristeguietia* sp., *Senna biflora* (mutuy), *Berberis lutea*, *Monnina* sp. y *Solanum* sp. Se incluyen arbolillos de *Oreopanax* sp., *Duranta* sp., *Escallonia* sp., *Myrcianthes* sp., *Gynoxis* sp., *Miconia* sp., *Ribes* sp. y *Vallea stipularis*.

Área Altoandina con Escasa Vegetaci3n

Áreas de mayor altitud en ámbitos periglaciares desde 2045 hasta 6094 msnm y en zonas escarpadas. Las especies de este ámbito resisten a condiciones extremas de clima y suelo (Figura 11). En este ecosistema est3n presentes: *Xenophyllum digitatum*, *Senecio canescens*, *Calceolaria scapiflora*, *Myniodes*

andina, *Caliophora horrida*, *Echinopsis maximiliana*, *Salpichroa gayi*, *Chuquiraga spinosa* y *Senecio*.



Figura 11. Asociaci3n vegetal en zonas periglaciares: *Stipa ichu* y *Pernettya prostrata* (ar3ndano silvestre). Foto: INAIGEM.

Diversidad Biol3gica Representativa en la Microcuenca Santa Cruz

El 3mbito de la microcuenca Santa Cruz, en su totalidad, pertenece al Parque Nacional Huascar3n. En esta 3rea Natural Protegida se han registrado 901 especies de flora, distribuidas en 114 familias y 374 g3neros (SERNANP, 2011). Un inventario preliminar de la flora en las quebradas Santa Cruz y Huaripampa report3 la presencia de 139 especies de flora y 11 morfoespecies, distribuidas en 43 familias y 98 g3neros (Casana, Leal-Pineda y Casana, 2010).

Seg3n las evaluaciones ecol3gicas r3pidas en la microcuenca, se registraron 65 especies de aves, de las cuales las familias m3s representadas fueron *Tyrannidae* (12 especies), *Furnariidae* (8 especies) y *Anatidae* (7 especies), dos especies end3micas (Figura 12), catalogadas como amenazadas seg3n el DS N3 043-2006-AG (INAIGEM, 2018).



Figura 12. *Atlapetes rufigenis*, un especie de ave casi amenazada (DS N3 043-2006-AG). Foto: INAIGEM.



Figura 13. *Lagidium peruanum* “viscacha”, un mamífero de hábitat rocoso. Foto: INAIGEM.



Figura 14. Área donde existieron los bosques de quishuar y el campamento de visitantes. Foto: INAIGEM.

Variación de Cobertura en Áreas Afectadas por el Aluvión

El aluvión produjo material aluviónico y se extendió a lo largo del fondo de valle de la microcuenca, en una extensión de 236 ha. Este hecho produjo la colmatación de áreas importantes de bosques, praderas y humedales, en especial la laguna Ichiccocha y el bosque de quishuar (Figura 9). La variación de la cobertura fue la siguiente: se redujo en 10.11 ha de superficie de las lagunas Ichiccocha y Jatuncocha, desaparecieron 47.42 ha de pajonales y matorrales, fueron arrasados 5.59 ha de bosques relictos de quishuar (Figura 14) y 106 ha de bofedales se colmataron de arena (Figura 15). La variación espacial de la cobertura fue desde laguna Artizón hasta la laguna Ichiccocha (Figura 16).

Recuperación de los Servicios Ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos (SE) son aquellos beneficios económicos, sociales y ambientales directos e indirectos que las personas obtienen del buen funcionamiento de los ecosistemas (Ley N° 30215, 2014). Se categorizan según sus funciones en SE de provisión, regulación, soporte y culturales. Los ecosistemas de montaña se caracterizan por cubrir la totalidad de estas categorías (MINAM, 2016). Los ecosistemas del fondo del valle de la microcuenca, afectados por el aluvión, están en un proceso lento de recuperación. Los ecosistemas proveedoras de la microcuenca Santa Cruz se redujeron en superficie producto del aluvión.

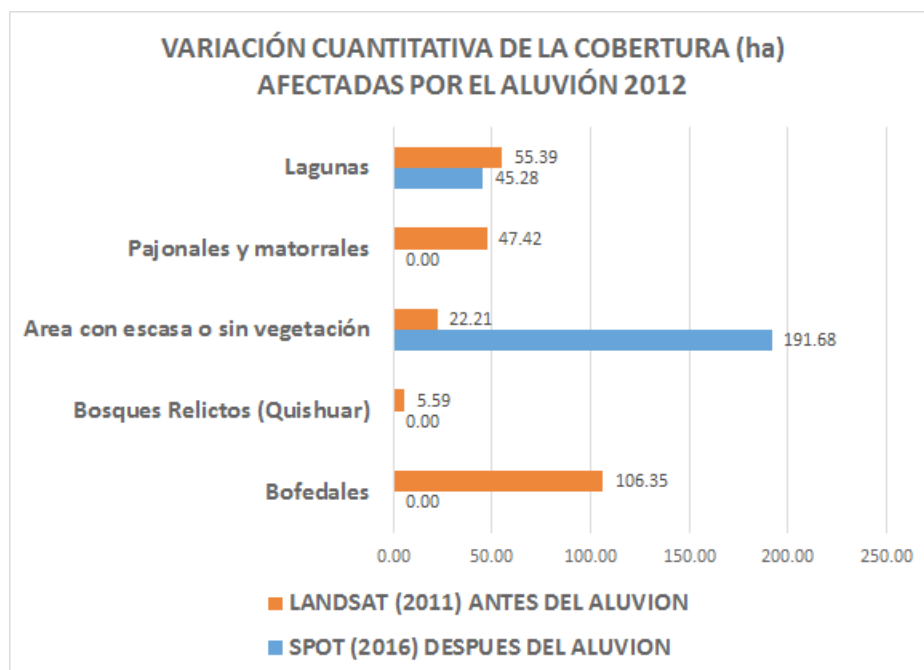


Figura 15. Variación de la cobertura vegetal producto del aluvión de 2012. Fuente: Elaboración propia.

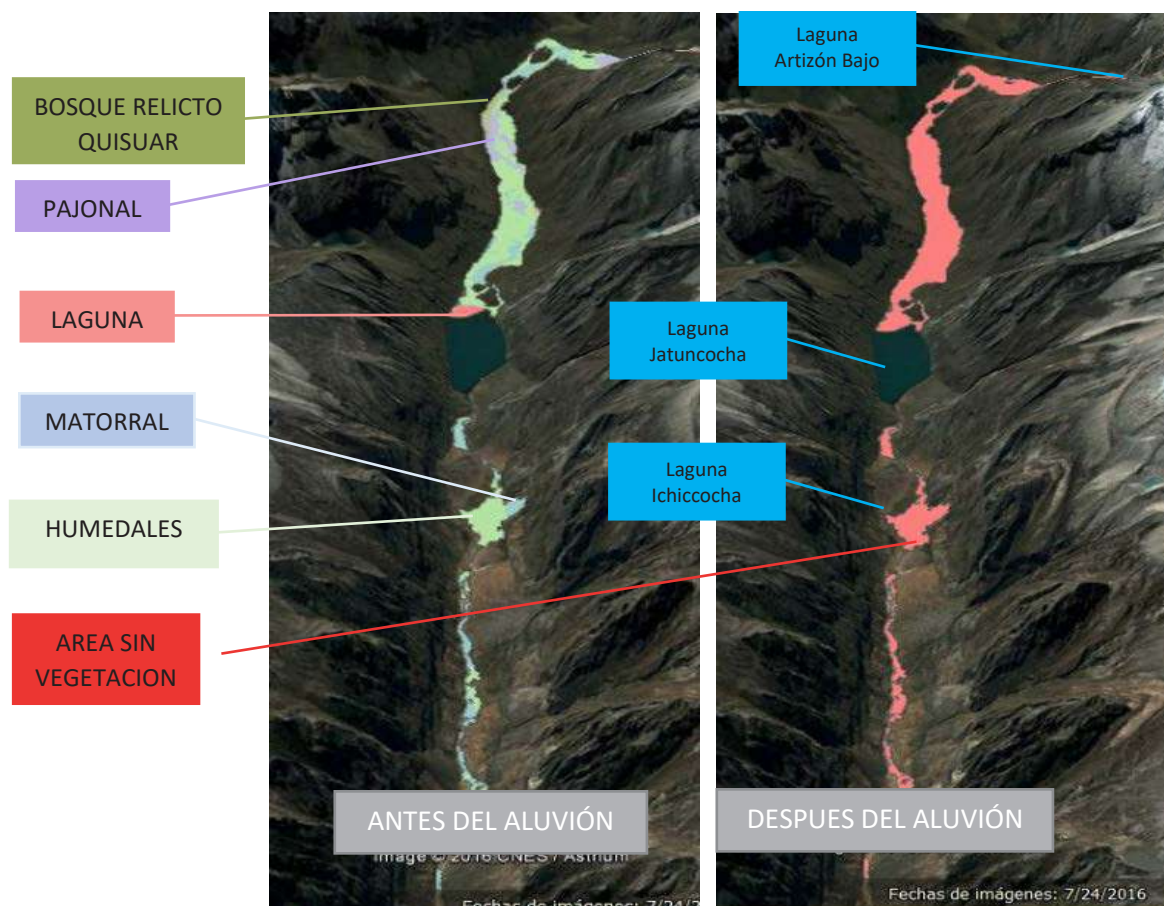


Figura 16. Distribución espacial de áreas afectadas por el aluvión de 2012 en el fondo de valle de la microcuenca Santa Cruz, antes y después del aluvión.

Servicios Ecosistémicos Afectados

Para identificar los servicios ecosistémicos afectados de interés para los actores locales, se realizaron entrevistas a líderes de la localidad de Cashapampa y un representante de la hidroeléctrica Santa Cruz, así como visitas técnicas de la DIEM. Los principales SE provenientes de la microcuenca a los que accede la población de Cashapampa y fueron afectados por el aluvión son:

- Servicios ecosistémicos de provisión: reducción de la calidad de agua (por presencia de sedimentos) para consumo humano, actividad agrícola, piscícola y energética. Según percepciones locales no se presentó reducción en la cantidad del recurso hídrico.
- Otro servicio de provisión es el generado por los ecosistemas pajonales. Por referencia de pobladores del lugar, más de 500 cabezas de ganado se pastorean en la microcuenca. Al convertirse las 236 ha de pajonales, bofedales y bosques en arenales, el ganado vacuno ha migrado a las partes más altas, sobrepastoreando áreas más frágiles de

la microcuenca (Figura 17). Los propietarios del ganado vacuno son pobladores de la localidad de Cashapampa.



Figura 17. Ganado vacuno en la microcuenca Santa Cruz. Foto: INAIGEM.

- Servicios ecosistémicos culturales: Reducción de la calidad paisajística del Circuito Turístico, “desapareció la laguna Ichiccocha”, así como aves y el bosque de Quisuarpampa. Las zonas de campamento son lugares atractivos para los visitantes y con fuentes de agua para consumo. Estas áreas se cubrieron de material aluviónico.

Desde el punto de investigación de la DIEM, también se consideró que otros servicios afectados son:

- De regulación: disminución de la retención de sedimentos y variación de la calidad fisicoquímica del agua.
- De soporte: reducción de la calidad de suelos.

Para conocer el estado de los servicios ecosistémicos se han realizado las siguientes evaluaciones.

Calidad Físicoquímica del Agua

Para analizar el estado de la calidad física-química del agua generada en los ecosistemas de montaña, en la microcuenca Santa Cruz se realizó el monitoreo periódico en 11 puntos durante los años 2016 y 2017 (Tabla 4).

Los resultados obtenidos han sido comparados con los Límites Máximos Permisibles para aguas de consumo, establecidos en la Ley General del Ambiente, Ley N°28611. Los parámetros monitoreados fueron: pH, DBO, conductividad eléctrica, realizados con el uso de una sonda multi-paramétrica portátil (Figura 18).

Los resultados obtenidos para el parámetro de pH nos muestran que en el punto ANC-SCR-09 se tiene el mayor valor de pH = 8.06, y los menores valores

en los puntos ANC-SCR-01 con pH = 5.15, ANC-SCR-02 con pH = 5.34 y ANC-SCR-03 con pH = 5.9. Los valores más bajos son indicadores de acidez, y están debajo de los límites máximos permisibles de pH para la calidad del agua para consumo humano. Estos valores mínimos se dieron durante el monitoreo de 22/05/17.

Los puntos ANC-SCR-01, -02 y -03 corresponden a la zona más cercana a la quebrada Arhuaycocha y cercana a los glaciares Taulliraju y Arhuay, y corresponden a la cabecera de la microcuenca.

Los resultados obtenidos para el parámetro de oxígeno disuelto nos muestran que en los puntos ANC-SCR-09 con OD = 7.96 mg/l y ANC-SCR-06 con OD = 7.39 mg/l se obtuvieron los mayores valores de oxígeno disuelto. Estos resultados se encuentran por encima del estándar nacional de calidad ambiental categoría 1 A1 (OD \geq 6 mg/L). Estos valores fueron obtenidos en el monitoreo del 18/10/16.

El punto ANC-SCR-09 corresponde a la quebrada Paccharuri, y el punto ANC-SCR-06 corresponde a la quebrada proveniente del nevado Quitaraju.

También se puede observar que en los otros puntos, ANC-SCR-01, -02, -03, -04, -05, -07, -08, -10 y -11, en alguno de los monitoreos realizados, se han obtenido valores máximos por encima de los 6 mg/l de oxígeno disuelto, que corresponde al valor del ECA para este parámetro.

Tabla 4. Ubicación de los puntos de monitoreo de calidad de aguas superficiales en la microcuenca Santa Cruz.

Código del punto de muestreo	Coordenadas (WGS 84)	
	X (Este)	Y (Norte)
ANC-SCR-01-0.10	211355	9013453
ANC-SCR-02-0.10	211797	9013389
ANC-SCR-03-0.10	211825	9013334
ANC-SCR-04-0.10	211171	9013347
ANC-SCR-05-0.10	208726	9012151
ANC-SCR-06-0.10	208370	9012397
ANC-SCR-07-0.10	208131	9012272
ANC-SCR-08-0.10	206971	9011759
ANC-SCR-09-0.10	198411	9009116
ANC-SCR-10-0.10	194840	9009127
ANC-SCR-11-0.10	209254	9012123

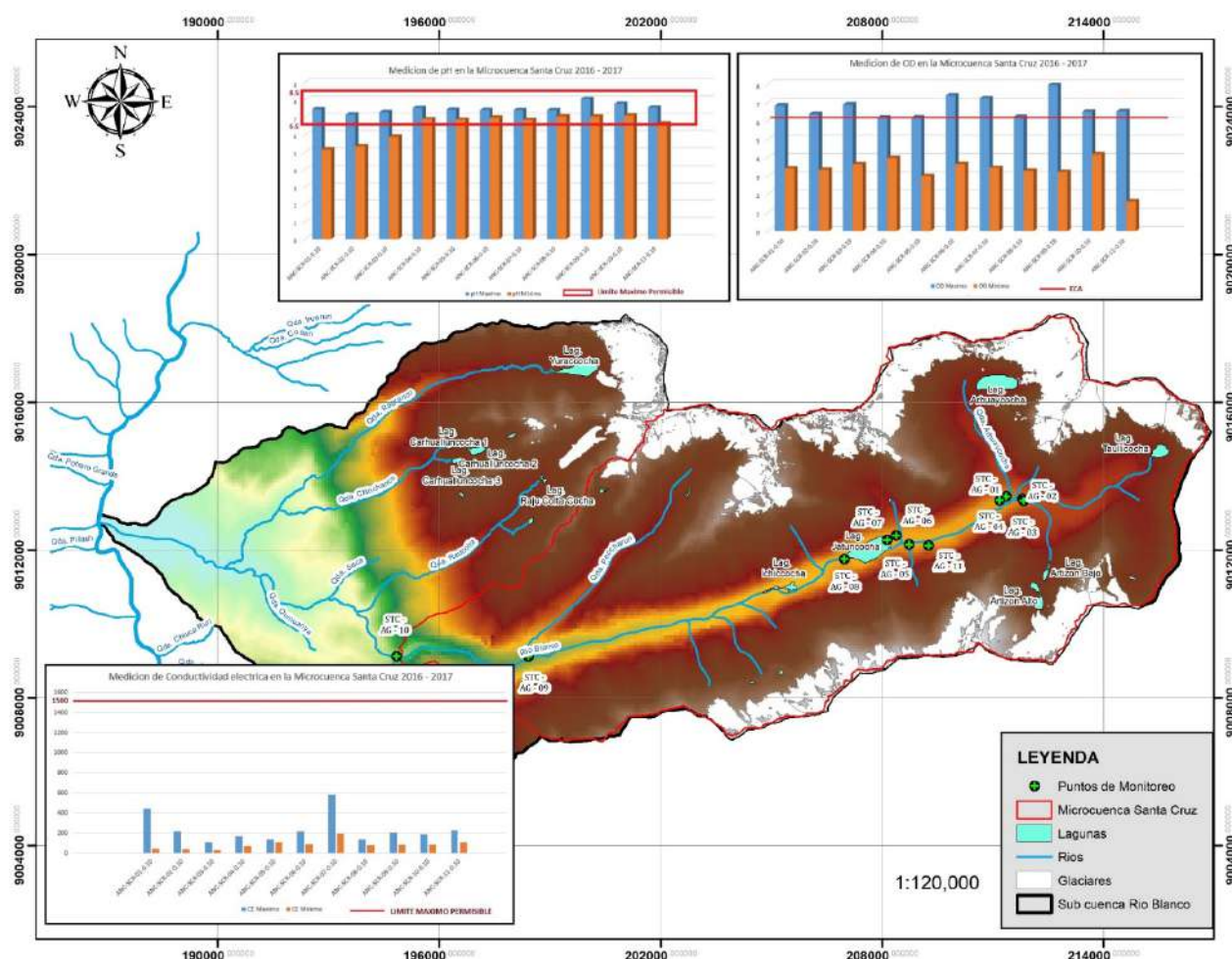


Figura 18. Distribución de los puntos de monitoreo y comparación de parámetros.

La presencia de oxígeno disuelto está relacionada a los niveles de oxígeno que la mayoría de los organismos acuáticos necesitan para sobrevivir y crecer. La presencia de oxígeno disuelto puede ser agregada por reaeración o fotosíntesis de las plantas.

Los resultados obtenidos para el parámetro de la conductividad nos muestran que, en los puntos ANC-SCR-07 con CE = 585 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y en el punto ANC-SCR-01 con CE = 446 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), se obtuvieron los mayores valores de conductividad eléctrica en la microcuenca, pero dichos valores aún se encuentran debajo del límite máximo permisible de calidad de agua para consumo humano para conductividad eléctrica, que es 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductividad eléctrica está directamente relacionada con la presencia de sales en el agua y también con la concentración de sólidos disueltos.

Para puntos donde se ha observado la mayor variación de pH, se ha analizado la tendencia del comportamiento de este parámetro. Si bien son aún pocos monitoreos realizados, nos permiten observar

las tendencias con fines de indagar con mayores estudios y tomar medidas de prevención (Figura 19).

Calidad Paisajística y Facilidades para el Desarrollo del Turismo de Aventura

Durante los últimos cinco años, la llegada de turistas extranjeros al Perú ha crecido a una tasa de 8% anual. El turismo se ha consolidado como el segundo sector económico no tradicional más importante del país, superado únicamente por la agroexportación (PROMPERÚ, 2017). El Circuito Turístico Trekking Santa Cruz–Huaripampa, es el circuito de trekking más famoso de la Cordillera Blanca gracias a los mejores paisajes del mundo y sobre todo por sus espectaculares montañas (Figuroa, s.f.). El aluvión del 2017 no alteró el número de visitantes que ha ingresado a esta microcuenca. Según los registros del SERNANP–PNH, el ingreso de visitantes ha ido incrementándose, sin embargo, luego del aluvión, se han producido las siguientes condiciones:

- (1) Variación del lugar de inicio de la caminata Santa Cruz – Huaripampa. Durante los años 2010-2011,

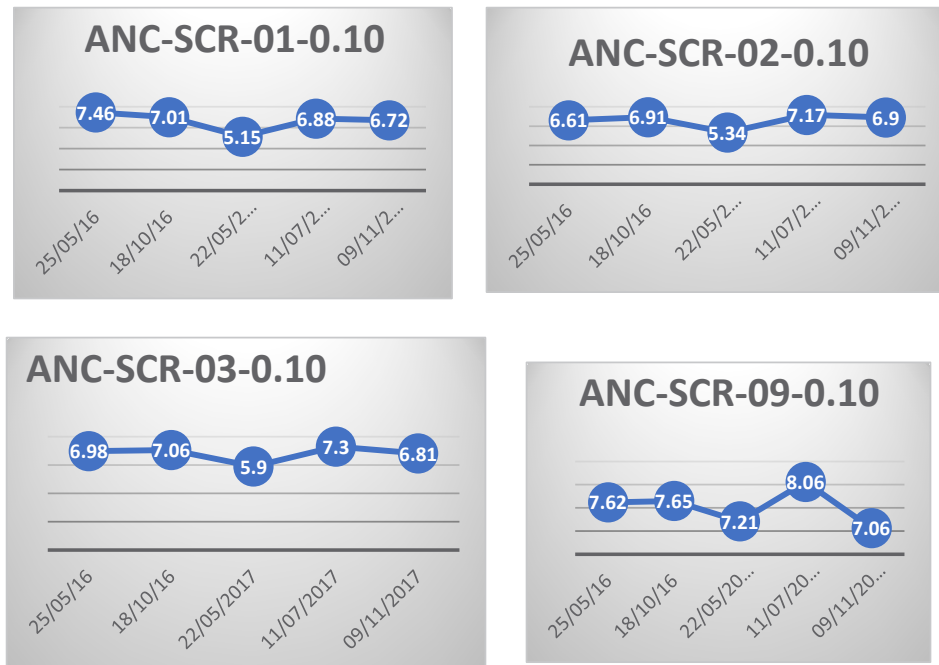


Figura 19. Tendencias en la calidad de agua de cuatro puntos con mayor amplitud de variación de pH.

la preferencia de inicio de la caminata era igual por ambas localidades (Figura 20). Luego del aluvión, los ingresos son mayoritariamente por la localidad de Huaripampa y culminan por Santa Cruz.

- (2) Como consecuencia del aluvión, las áreas de campamento para visitantes existentes (Quishuarpampa y Jatuncocha) han sido desplazadas, debido a que no prestan condiciones (calidad de agua, vientos y otros) y no son atractivos, repercutiendo directamente en la conservación de otros espacios de la microcuenca.
- (3) La calidad paisajística se ha reducido, y esta es una afirmación de visitantes y empresarios.

Incluso su difusión se hace por medios masivos. Por ejemplo:

“Posted by hiker August 13, 2014: While I was aware of the landslide and the new route the path now took, I was not aware that my planned camp site had also been washed away! Worse, the landslide was so strong that any flat, treeless areas were torn up, meaning finding a wild camping spot was also impossible. The only remaining spots were heavily forested and steeply sloping valley edges, and the new and unstable sheer cliffs meant getting to the river for drinking water was impossible. Not good.”

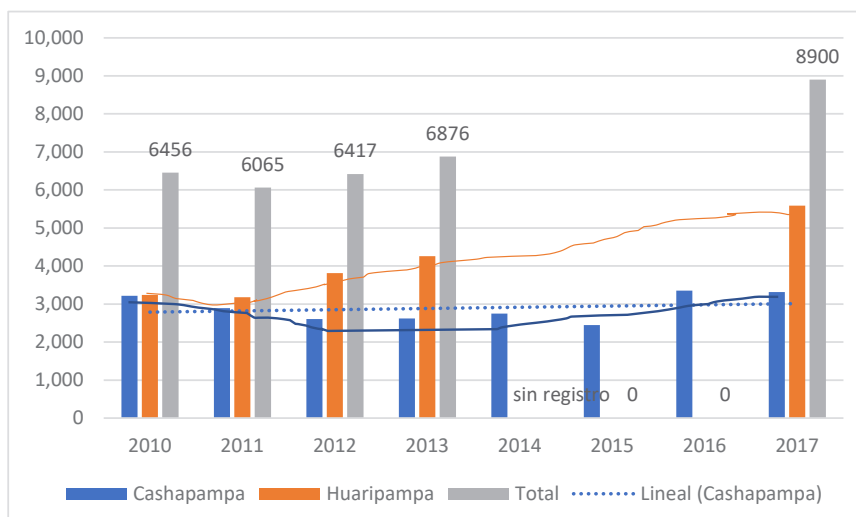


Figura 20. Ingreso de visitantes a la quebrada Santa Cruz. Fuente: Parque Nacional Huascarán.

Instalaci3n de Parcelas de Investigaci3n para la Recuperaci3n de los Servicios Ecosist3micos

Para iniciar con la recuperaci3n y conservaci3n de las funciones de los ecosistemas de monta1a mediante la investigaci3n aplicada, usando estrategias participativas, como alianzas interinstitucionales (incluyendo al Estado, organizaciones privadas y organizaciones de base) y enfoque de cuenca, se establecieron dos parcelas pilotos (Figura 21), como laboratorios de ense1anza-aprendizaje, innovaci3n de tecnolog1as y articulaci3n con pobladores y tomadores de decisi3n, cuyos resultados servir1n para una intervenci3n a mayor escala.

Parcela Jatuncocha: Activaci3n de Procesos de Edafizaci3n

La parcela de investigaci3n se encuentra en las coordenadas UTM del centroide Norte 9012282m - Este 209022m, a 3890 msnm, en la margen izquierda de la quebrada Santa Cruz. La parcela de investigaci3n (Figura 22) comprende 15 ha, una zona aluvi3nica donde existieron bofedales. Presenta dep3sitos de

sedimento de arena con poca presencia de vegetaci3n, observ1ndose peque1as manchas de plantas pioneras, como *Lupinus* sp., el chocho silvestre, en los dep3sitos diluviofluviales (Figura 23).

En esta parcela se ha elaborado la l1nea base de suelos, para ello se han realizado cinco excavaciones (calicatas) hasta una profundidad de 130 cm. Todas est1n conformadas por un dep3sito muy parecido: flujo de barro (amasijo ca3tico de part1culas y fragmentos rocosos), que var1a un poco en cuanto a la pedregosidad, masividad y conductividad hidr1ulica. En una de las calicatas, a 100 cm se encontr3 parte del humedal antiguo, donde se denota el proceso erosivo previo, porque se encuentra una capa muy delgada del material org1nico propio del humedal anterior, luego el estrato gleizado profundo con sus cantos rodados. En general los estratos analizados presentan reacciones ultra1cida (pH 2.9) hasta a muy fuertemente 1cida (pH 4.9), sin presencia significativa de sales solubles ni de carbonatos de calcio (Reyes Nolasco, 2016).

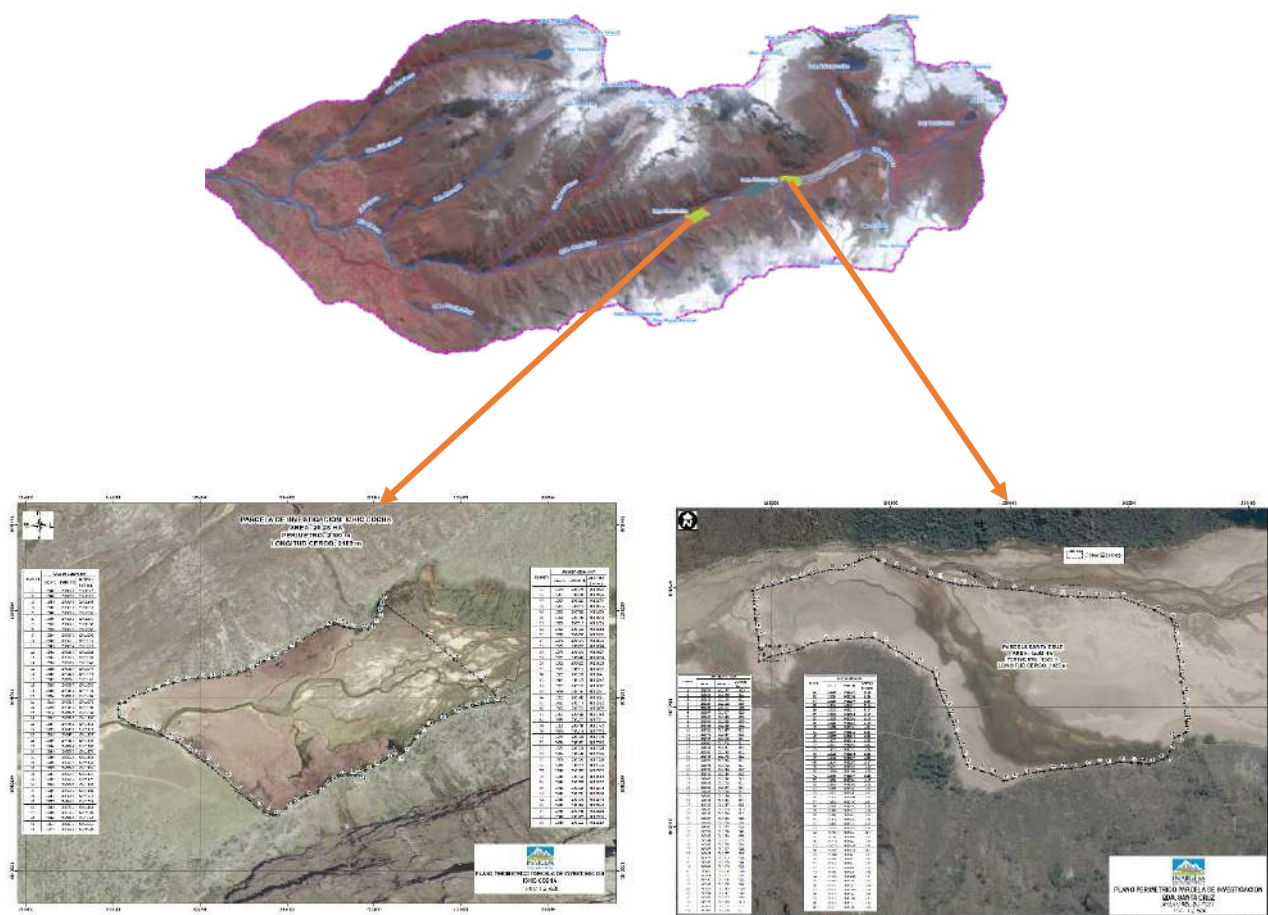


Figura 21. Ubicaci3n de las parcelas de investigaci3n en la microcuenca Santa Cruz.



Figura 22. Investigación de la activación de procesos edáficos. Foto: INAIGEM.



Figura 23. Procesos naturales de sucesión ecológica. Foto: INAIGEM.

Esta parcela, a pesar de tener escasa vegetación, muestra pequeños parches de vegetación con presencia de *Pennisetum clandestinum* y especies pioneras, *Belloa longifolia*, *Hypochaeris taraxacoides*, *Cyperus niger*, *Eleocharis albibracteata*, *Juncus stipulatus*, *Pennisetum clandestinum*, *Poa subspicata*, *Polypogon elongatus*, *Muehlenbeckia volcánica* y *Bryum* sp. (Olivera, 2016). En esta parcela se han iniciado investigaciones para la activación de procesos edáficos, a fin de acelerar sucesiones ecológicas libres de la presión antrópica.

Parcela Ichicocha: Recuperación de la Laguna

La parcela de investigación se encuentra en las coordenadas UTM del centroide Norte 9011000 m - Este 209022 m, a 3860 msnm, en la margen izquierda de la quebrada Santa Cruz. La parcela de investigación comprende 20 ha (5 ha de laguna y 15 ha de bofedal), que fueron colmatadas por depósitos diluviofluviales. Litológicamente, la parcela está conformada predominantemente por depósitos de sedimentos lacustres y fluviales, complementada por sedimentos coluviodiluviales provenientes de los flancos. Geomorfológicamente, corresponde en su mayor parte a una planicie lacustre. Los suelos son

de característica extremadamente ácida con pH desde 3.9 a 4.9. Se puede describir los suelos de la parcela en términos de las siguientes unidades.

- (1) **Planicie lacustre ligeramente sedimentada y poco perturbada** - Relieve cóncavo, que almacena un cuerpo de agua permanente. Corresponde a partes del vaso donde los sedimentos han ingresado en menores cantidades. La mayor parte está cubierta por una vegetación hidrófita, principalmente de las familias Juncaceae, Ciperaceae y Poaceae.
- (2) **Planicie lacustre moderadamente sedimentada y moderadamente perturbada** - Relieve plano a ligeramente ondulado, napa fluctuante muy cerca o sobre la superficie, con montículos de materiales orgánicos superficiales en proceso de descomposición. La última deposición de sedimentos producida en 2012 fue predominantemente fina (limos), que sepultó parcialmente la cubierta vegetal también de tipo hidrófita.
- (3) **Planicie fluviolacustre sedimentada y moderadamente perturbada** - Áreas donde han ocurrido procesos de erosión-deposición del estrato superficial. En gran parte del área, la deposición final superficial ha sido de sedimentos predominantemente finos (limosos), los que, al secarse, han generado grietas de más de cinco cm de ancho. La vegetación hidrófita ha sido removida, y nueva vegetación como las especies de las familias Asteraceae y Poaceae están repoblando el área.
- (4) **Planicie fluviolacustre sedimentada fuertemente perturbada** - Juntamente con la unidad anteriormente descrita, corresponde a la zona de divagación del río. Ha sufrido la acción de los desbordes en las crecidas significativas de los últimos tiempos y, con ello, procesos de erosión-deposición. En la mayor parte del área, el estrato superficial ha sido erosionado parcial o totalmente, donde posteriormente se ha depositado un manto de arena gruesa. La cobertura vegetal en la unidad es diversa y pobremente desarrollada. Predominan especies herbáceas de la familia Poaceae, que se asocian con arbustivas, entre las cuales destaca el género *Lupinus*.
- (5) **Planicie diluvial moderadamente compactada** - Corresponde a la parte distal (baja) de un

abanico diluvial contiguo, con una pendiente entre 8 y 15%. Los sedimentos derivados de rocas plutónicas han sido transportados desde el abanico con la escorrentía laminar durante las épocas lluviosas. Presenta una napa fluctuante según la estacionalidad. Muestra indicios de compactación por sobrepastoreo. La cobertura vegetal está dominada por especies herbáceas de la familia Poaceae, poco desarrolladas.

La ganadería extensiva limitó la recuperación natural de la vegetación y mediante la clausura con cercos eléctricos se ha permitido el desarrollo de la vegetación y se ha mejorado la acumulación de agua en la laguna y bofedales (Figuras 24 y 25).



Figura 24. Áreas afectadas por el aluvión de 2012 en procesos lentos de recuperación, debido a la presencia de ganado. Foto: INAIGEM.



Figura 25. Vegetación recuperada en áreas con clausura de la laguna Ichiccocha y su bofedal: *Scirpus californicus* (totora), *S. rigidus*, *Calamagrostis rigescens* y *C. vicunaran*. Foto: INAIGEM.

Respuesta de los Actores

Luego de la rehabilitación de los servicios básicos afectados por el aluvión, los procesos de recuperación de ecosistemas y la reconstrucción en espacios protegidos por parte de las organizaciones locales e instancias gubernamentales, ha sido casi nula. Desde 2015, el INAIGEM ha desarrollado estudios en la subcuenca e investigaciones en las parcelas, con la

finalidad de generar procesos sociales y ambientales para la recuperación de los servicios ecosistémicos. Esta intervención ha tenido respuestas favorables por parte de los pobladores, siendo el proceso social aplicado lo siguiente.

- **Selección de áreas:** Comprendió la recopilación de información existente y la socialización en un taller participativo con instituciones involucradas (organización de auxiliares de alta montaña y usuarios de pastos naturales) para priorizar áreas donde se instalaron las parcelas piloto. Seguidamente, se realizaron inspecciones de campo para definir áreas representativas con criterios ambientales, económicos y sociales.

- **Selección y priorización de indicadores y parámetros de medición:** Constituyó un proceso técnico integrado con el interés local. En talleres y reuniones, se socializaron los indicadores de investigación y monitoreo, la población priorizó los siguientes indicadores: a) recuperación de la cobertura, expresado localmente como “el estado de los ecosistemas es regular, está seco y con poca presencia de verdor”, b) reducción del agua para consumo y riego, c) áreas de incendios forestales, d) presencia de residuos sólidos y e) cambios en la variabilidad climática.

- **Instalación de áreas con fines de investigación:** Durante el año 2016, mediante reuniones y/o talleres con los propietarios de las parcelas, se inició un proceso de información y negociación. Una vez logrados los acuerdos, se cercaron las áreas y se identificaron áreas testigo sin cercar.

- **Monitoreo a la evolución de los parámetros:** Realizado para observar y sustentar la evolución de los ecosistemas establecidos en la parcela, se elaboró la línea base de suelo y cobertura vegetal, observaciones mediante inspecciones de campo periódico. En la parcela Jatuncocha se está ejecutando la investigación “Activación de los Procesos de Edafización a través de la Implantación de Especies Pioneras en los Depósitos Diluvio-Fluviales de la Quebrada Santa Cruz - Parque Nacional Huascarán, 2016”.

- **La población de la localidad de Cashapampa:** Integrada en las asociaciones de Auxiliares de Alta Montaña y los Usuarios de Pastos Naturales, han observado mejoras positivas en las dos parcelas y mediante talleres se ha informado la evolución de

parámetros. Los próximos plazos acordados con el INAIGEM son para el incremento del área con protección y excluidas para la ganadería y para elevar de manera natural el dique de la laguna Ichiccocha.

Conclusiones y Recomendaciones

El aluvión de 2012 producido en la subcuenca río Blanco afectó el fondo de valle de la microcuenca Santa Cruz mediante colmatación y arrastre en una superficie de 236 ha, que comprende humedales (lagunas y bofedales), bosques altoandinos y pajonales. La reducción de estos ecosistemas afectó los servicios de provisión de agua en cuanto a calidad y áreas de pastoreo para ganado, servicios culturales por la disminución de la calidad paisajística del circuito de caminata Llanganuco – Santa Cruz del Parque Nacional Huascarán.

Hasta el año 2015, los actores locales, integrados por la municipalidad distrital de Santa Cruz, los usuarios de pastos naturales, organizaciones de usuarios de agua y asociaciones de servicios turísticos, culminaron acciones de rehabilitación. Sin embargo, las acciones de recuperación de ecosistemas están en procesos de investigación impulsados por el INAIGEM y organizaciones locales. El inicio de la recuperación se ha realizado con la clausura mediante la instalación de cercos eléctricos en 35 hectáreas.

Los resultados en las investigaciones, aún iniciales y desarrolladas en el corto plazo, son tangibles, replicables en otras áreas (ya sea en la misma microcuenca, así como casos a nivel nacional). Los estudios de línea base realizados mostraron que el agua presenta sedimentos causados por el aluvión y problemas de acidez en algunos puntos monitoreados. Desde la percepción local, disminuir la presencia de sedimentos para que el agua pueda ser consumida ha demorado aproximadamente 3 años. Ambas parcelas de investigación presentan suelos con reacciones ultra ácidas (pH 2.9) a muy fuertemente ácidas (pH 4.9). La vegetación existente en los humedales con menor afectación son las poáceas, juncáceas y ciperáceas mientras que en los humedales más afectados, la vegetación ha sido removida y existe nueva vegetación con especies de la familia Asterácea. En áreas con predominio de depósitos aluviales, la vegetación pionera resalta con *Pennisetum clandestinum* y *Lupinus* sp.

Promover la mayor concurrencia interinstitucional y multidisciplinaria para poder incorporar las acciones ejecutadas en los procesos de desarrollo social asociados a la gestión de riesgos de desastres y la recuperación de los servicios ecosistémicos. De igual manera, es conveniente realizar acciones para determinar los estudios necesarios para mejorar las condiciones de seguridad de las lagunas.

Referencias

- Abell, R., Thieme, M. L., Revenga, C., Bryer, M., Kottelat, M., Bogutskaya, N.,... Petry, P. (2008). Freshwater ecoregions of the world: A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, 58(5), 403-414. <https://doi.org/10.1641/B580507>
- Casana, J., Leal-Pinedo, J. y Casana, R. (2010). Inventario preliminar de la flora en las quebradas Santa Cruz y Huaripama: Parque Nacional Huascarán, Ancash, Perú. *The Biologist*, 8(2), 244-253.
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R. I., Halloy, S., Salgado, S.... Becerra, M. T. (Eds.). (2012). *Biodiversidad y cambio climático en los Andes tropicales: Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación*. Lima y Quito, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN).
- Decreto Supremo N° 065-2012-PCM. (9 de junio de 2012). *Declaran el estado de emergencia en las cuencas de las lagunas Artizón Bajo y Jatuncocha, ubicadas en el distrito de Santa Cruz, provincia de Huaylas, en el departamento de Ancash*. *Diario Oficial El Peruano*, Normas Legales 468026-468027.
- Egan, P. A. y Price, M. F. (2014). *Las montañas como torres de agua del mundo: Protegiendo el agua y los servicios ecosistémicos de montaña ante el cambio climático: Informe de política*. París, UICN. <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002308/230850S.pdf>
- EIRD. (2002). *Hacia el desarrollo sostenible de las montañas por medio de la reducción de desastres*. Parí, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD).

- Figueroa Blas, C. (s.f.). *Turismo sostenible en el Parque Nacional Huascarán*. SERNANP. https://issuu.com/visitperu/docs/turismo_sostenible_en_el_pnh
- INAIGEM. (2016). Informe de inspección: Identificación y georeferenciación de áreas de investigación en la parcela de pastos - Comunidad de Cátaç - subcuenca Pachacoto. Huaraz, INAIGEM. https://www.inaigem.gob.pe/download/ecosistemas/pachacoto/Inspeccion_pachacoto_parcela.pdf
- INAIGEM. (2017). Informe de inspección de emergencia: Laguna Arhuaycocha. Huaraz, INAIGEM. https://www.inaigem.gob.pe/download/glaciares/emergencia/Informe_Tecnico_laguna_Arhuaycocha.pdf
- INAIGEM. (2018). *Informe preliminar de línea base de la subcuenca Quillcay*. Huaraz, INAIGEM.
- Ley N° 30215. *Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos*. Lima, *Diario Oficial El Peruano*, Normas Legales, 29 de junio de 2014, 526501-526503.
- MINAM. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal: Memoria descriptiva*. Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).
- MINAM. (2016). *Programa presupuestal N° 0144: Conservación y uso sostenible de ecosistemas para la provisión de servicios ecosistémicos*. Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Mountain Partnership. (s/f). *Las montañas son las torres de agua del mundo; Una llamada a la acción a favor de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)*. Obtenido de http://www.fao.org/fileadmin/templates/mountain_partnership/doc/POLICY_BRIEFS/SDGs_and_mountains_water_ES.pdf
- Olivera Gonzales, P. E. (2016). *Informe: Elaboración de línea base de flora y vegetación para tres parcelas de investigación en ecosistemas de montaña*. Huaraz, INAIGEM.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C.,... Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- PNUD, PNUMA, UICN e IM. (2016). *El futuro ancestral: La adaptación basada en ecosistemas*. Proyecto EbA Montaña. Lima.
- PROMPERÚ. (2017). *Perfil del turista extranjero 2017*. Lima, PROMPERÚ.
- Reyes Nolasco, A. W. (2016). *Informe de línea base de suelos para tres parcelas de investigación en ecosistemas de montaña*. Huaraz, INAIGEM.
- Salvador, M. (2012). Informe N° 06-2012-SERNANP-PNH/MSP. Huaraz, Parque Nacional Huascarán, SERNANP.
- Santander, Ó. (2017). Línea base de diversidad biológica para la investigación en ecosistemas de montaña en parcelas de investigación priorizadas por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. *Boletín INAIGEM*, 3, 35-53.
- SERNANP. (2011). *Plan maestro del Parque Nacional Huascarán 2010-2015*. Lima, Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas or el Estado (SERNANP).
- Sevink, J. (2009). *La Cordillera Blanca, un paisaje explicado*. Lima, Universiteit van Amsterdam / Instituto de Montaña.
- UGRH. (2001). *Informe Técnico de Inspección de Lagunas*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Instituto Nacional de Recursos Nacionales (INRENA).
- UGRH. (2005). *Inspección de lagunas: Jatuncocha, Arhuaycocha, Taullicocha y Artizón*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Instituto Nacional de Recursos Nacionales (INRENA).
- UGRH. (2012). *Informe detallado de la laguna Artizón Bajo*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Autoridad Nacional del Agua (ANA).

- UGRH. (s/f). *Registro histórico de avalanchas en el departamento de Ancash*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Autoridad Nacional del Agua (ANA). <https://es.scribd.com/document/266294697/REGISTRO-HISTORICO-DE-AVALANCHAS-pdf>
- Wegner, S. A. (2014). *Lo que el agua se llevó: Consecuencias y lecciones del Aluvión de Huaraz de 1941*. Nota Técnica 7 de la serie “Notas Técnicas sobre el Cambio Climático”. Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Valderrama, P. y Vilca, Ó. (2012). Dinámica e implicancias del aluvión de la laguna 513, Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69(3), 400-406.

Pasantías Formativas del Instituto de Montaña: Generación de Información y Capacidades

Formative Internships of the Mountain Institute: Generation of Information and Skills

Isabel Menéndez¹ y Jorge Recharte Bullard¹

¹*Instituto de Montaña / The Mountain Institute, Huaraz, Ancash*

Resumen

La región andina se enfrenta al reto inminente que supone la generación de acciones que favorezcan la adaptación y mitigación de los efectos originados por el cambio climático. Los ecosistemas andinos y las poblaciones humanas que de ellos forman parte son altamente vulnerables a la variabilidad climática que estamos enfrentando. Para desarrollar estas herramientas de adaptación, es crucial el impulso de la investigación científica de calidad, así como la recuperación y puesta en práctica de los conocimientos ancestrales desarrollados a lo largo de miles de años por las poblaciones humanas que habitan este territorio cambiante.

A fin de llevar a cabo estos propósitos a escala local en el entorno de la Cordillera Blanca, se detectaron una serie de brechas de información a ser cerradas, priorizando la falta y la dispersión de información de base ambiental a escala local que sirva para la realización de estudios e investigaciones que redunden en una mejora de las condiciones de vida de las poblaciones altoandinas.

Asimismo, desde el Instituto de Montaña (TMI) se detectó la necesidad de poner en alza y apoyar el talento y motivación de los jóvenes egresados de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM). Estas pasantías universitarias tienen una duración de entre seis y ocho meses, y constituyen un primer acercamiento laboral, una experiencia de trabajo junto a las comunidades rurales, la posibilidad de formar parte de un equipo interdisciplinario, así como la oportunidad de recibir capacitación especializada en los temas de trabajo desarrollados.

En el marco del programa, los y las pasantes han realizado hasta la fecha estudios base a nivel

ecológico e hidrológico, tratamiento y sistematización de información hidrometeorológica recogida por el Centro de Investigación Ambiental para el Desarrollo (CIAD) de la UNASAM, levantamientos y tratamiento de información socioeconómica y modelamientos y evaluación del peligro proveniente de avalanchas glaciares. Los resultados y la información recabada han servido de base para estudios más específicos en torno a la implementación de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MRSE) y para la redacción de varios perfiles de proyectos de desarrollo como los Proyectos de Inversión Pública (PIP), entre otros.

Palabras clave: *Pasantías, adaptación, capacitación, investigación, información*

Abstract

The Andean region faces the imminent challenge that involves the generation of actions that favor the adaptation to and mitigation of the effects that climate change is producing. The Andean ecosystems and the human populations that are part of them are highly vulnerable to the climatic variability that we are facing. To develop these adaptation tools, the promotion of quality scientific research is crucial, as well as the recovery and implementation of the ancestral knowledge developed over thousands of years by the human populations that inhabit this changing territory.

To carry out these purposes at a local scale in the surroundings of the Cordillera Blanca, a series of information gaps were detected that needed to be closed, prioritizing the lack and dispersion of baseline environmental information at a local scale that would serve to carry out studies and research that result in an improvement of the living conditions of the high Andean populations.

[Nota del Editor: El presente es un resumen de varias experiencias investigativas y educativas realizadas por el Instituto de Montaña en el Callejón de Huaylas, pero no se trata del material de las investigaciones en sí.]

Also, the Mountain Institute (TMI) detected the need to raise and support the talent and motivation of young graduates of the Santiago Antúnez de Mayolo National University (UNASAM). These university internships last between six and eight months and constitute a first work contact, an experience of working with rural communities, the possibility of being part of an interdisciplinary team, as well as the opportunity to receive specialized training in topics of the work carried out.

In the framework of the program, the interns have carried out basic studies at an ecological and hydrological level, treatment and systematization of hydrometeorological information collected by the Center for Environmental Research for Development (CIAD) of the UNASAM, surveys and treatment of socio-economic information and modeling and assessment of the danger from glacial avalanches. The results and information gathered have served as the basis for more specific studies regarding the implementation of Ecosystem Service Compensation Mechanisms (MRSE) and for the drafting of various profiles of development projects such as Public Investment Projects (PIP), among others.

Keywords: *Internships, adaptation, training, research, information*

Los paisajes y sociedades de montaña han sido descritos como “islas en el cielo”, resultado de la amplitud altitudinal y la fragmentación de estos paisajes cortados por valles profundos (Rhoades, 2008; Recharte, Arévalo y Glave, 2003). El clima, la cobertura vegetal o las condiciones sociales pueden variar de manera importante en distancias muy cortas. Pese a que el conocimiento de esta diversidad es central para la gestión de estos ecosistemas y para los estudios relacionados con la adaptación al cambio climático, la información más básica sobre estos paisajes resulta escasa, inexistente o sufre una gran dispersión y es de difícil accesibilidad. En esta nota presentamos el programa de pasantías del Instituto de Montaña con estudiantes de último año en diversas facultades de la UNASAM, como una estrategia que busca cerrar esta brecha de gestión en los socioecosistemas de montaña.²

Tipo de Información Necesaria para la Gestión y Adaptación en Regiones de Montaña

Los campos del conocimiento que necesariamente precisan ser abordados en este tipo de investigaciones -en la mayoría de los casos multidisciplinarios- son, como mínimo, el ambiental y el socioeconómico. Para ello se requieren amplios rangos de series de información meteorológica, estudios de cantidad-calidad de agua, estudios geológicos y edáficos de la zona, entre otros. En el ámbito socioeconómico, se requieren datos demográficos históricos y actuales, dinámicas y sectores económicos, información acerca de la institucionalidad y organización social o ciertos estudios sociológicos y antropológicos, dependiendo del objetivo y escala de nuestro trabajo.

Ciencia y Conocimiento Tradicional

El desarrollo de procedimientos para comunicar a los estudiantes y las disciplinas científicas con conocimiento tradicional ha sido uno de los objetivos transversales de la pasantía. En la región andina existe una historia profunda en torno a la relación del ser humano con la naturaleza y su adaptación a la variabilidad climática. Identificamos la necesidad de integración entre el conocimiento científico y ancestral de los pueblos como una de las brechas que hace falta cerrar para construir respuestas sostenibles a esta nueva realidad que trae consigo el cambio climático. Los estudiantes recibieron capacitación para iniciarse en este enfoque de trabajo colaborativo.

Brechas

El componente de información e investigación del proyecto identificó y priorizó el trabajo en una serie de brechas de información consideradas claves en la toma de decisiones para la adaptación a escala local. El programa de pasantías trató de contribuir con la generación de información a escala muy local para cerrar algunas de las brechas identificadas, las cuales se resumen en el siguiente listado.

1. Datos hidrometeorológicos temporalmente discontinuos, espacialmente escasos y por lo general con baja accesibilidad, lo que genera una alta incertidumbre en los estudios y modelos

²Término que comprende todo sistema social (cultura, economía, organización social y política) integrado dentro de un sistema ecológico (naturaleza), desde lo local a lo global en un espacio-tiempo determinado (Gallopín, Gutman y Maletta, 1989).

desarrollados a nivel regional y de cuenca (IPCC, 2014a).

2. Según reflejan Buytaert, Cuesta-Camacho y Tobón (2011), IPCC (2014b) y Cuesta et al. (2012), existe una carencia de estudios de base y prospectivos a nivel climático, ecosistémico e hidrológico y una escasez de modelos que aborden específicamente los efectos del cambio climático y su variabilidad sobre estos sistemas y sobre la población en la región andina. Además, la mayoría de los modelos trabajan con resoluciones muy gruesas, mientras que nuestros trabajos se circunscriben, por lo general, a la escala de cuenca. Estos modelos suelen poseer una alta incertidumbre y no incorporar las especificidades locales, lo que no facilita la toma de decisiones y la búsqueda de soluciones en relación a la adaptación.
3. Desarrollo de metodologías que permitan incorporar las observaciones y percepciones locales a las dinámicas naturales objeto de estudio, como pueden ser variables meteorológicas, cambios en la fenología y biodiversidad local, entre otras.
4. Falta de experiencias y metodologías de evaluación del impacto del cambio climático y de la valoración económica de los servicios ecosistémicos con la finalidad de establecer mecanismos de retribución por los mismos.

Pasantía

Por los motivos anteriormente descritos, el proyecto cooperativo del Instituto de Montaña y USAID denominado “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña”, desarrollado entre los años 2014 y 2017, dedicó uno de sus tres componentes enteramente a la producción y gestión de dicho conocimiento y a la identificación de brechas de información necesaria para abordar la respuesta ante el cambio climático en el territorio andino, específicamente en nuestra área de trabajo en Ancash. En este componente, y como uno de los pilares fundamentales del mismo, se enmarca el programa de pasantías, que se describe a continuación.

Objetivos y Metodología de la Pasantía

El programa de pasantías formativas está encaminado a brindar un acercamiento a la

investigación científica en el campo del cambio climático a jóvenes universitarios egresados a la vez que adquieren una primera experiencia profesional, se capacitan, generan información y desarrollan y fomentan estrategias de adaptación al cambio climático (ACC) en las comunidades rurales de la Región Ancash. La pasantía se dirigió exclusivamente a egresadas/os de diferentes facultades de la universidad pública de Huaraz, la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), con el fin de fortalecer las capacidades e incentivar la investigación sobre cambio climático en esta institución, de forma que esta sea una fuente de servicios técnicos hacia gobiernos locales, mancomunidades municipales y comunidades con el fin de responder a los retos de la adaptación al cambio climático en Ancash. El propósito final reside en que estos estudios se conviertan en fuentes de información para futuros proyectos de inversión pública (PIP), investigaciones científicas aplicadas e implementación de tecnología apropiada que redunde directamente en las comunidades altoandinas en sus procesos de adaptación al cambio climático.

Las pasantías universitarias (véase Figura 1) se llevan a cabo bajo una metodología inter y transdisciplinaria, encaminada a generar una información exhaustiva y un aprendizaje integrador a través de una aproximación respetuosa a una realidad tan compleja como es la de las comunidades y ecosistemas andinos de alta montaña. Por ello, y cuando fue necesario, los trabajos se desarrollaron bajo un enfoque de estudio e investigación participativo junto con la población local, incorporando los saberes y prácticas ancestrales locales en la generación y estudio de conocimiento científico, tal y como viene realizando el TMI como parte de su metodología de base (Figura 1). Asimismo, se buscó la alianza con instituciones locales e internacionales como son el INAIGEM y la Universidad de Texas, que compartieron con el Instituto de Montaña y la UNASAM la coordinación y asesoramiento de los participantes durante sus trabajos.

La capacitación continua es parte esencial del programa, lo que da la oportunidad a el/la pasante de profundizar y especializarse en su tema de trabajo. Los cursos se programan de acuerdo a las necesidades detectadas y de acuerdo a las necesidades de especialización a medida que la investigación avanza. Algunas de las llevadas a cabo son: escritura y redacción de textos científicos, facilitación con

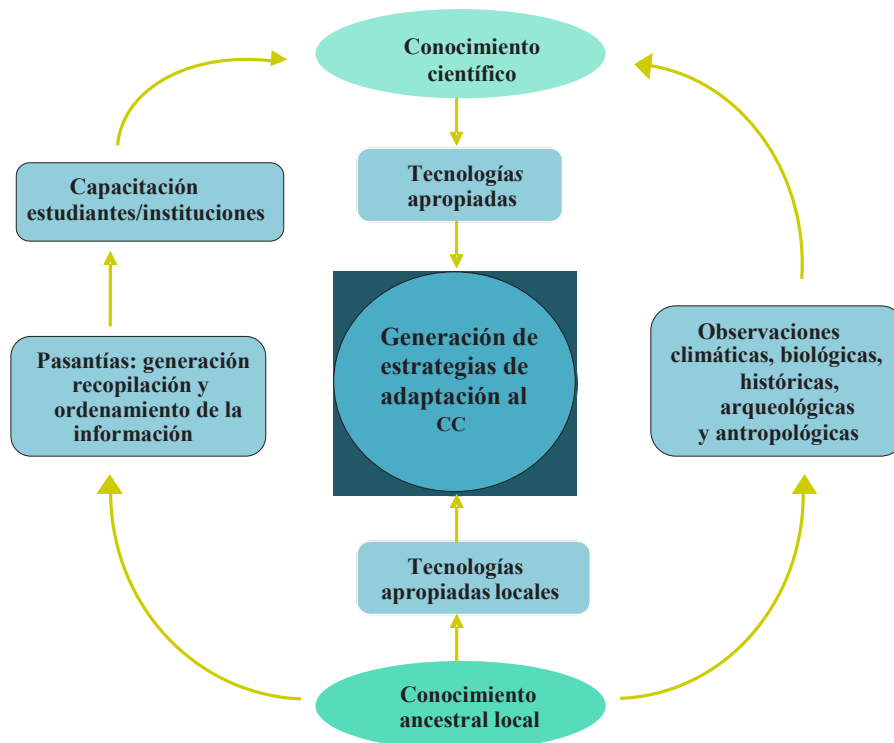


Figura 1. Diagrama metodológico del programa de pasantía. Adaptado de Torres (2015).

comunidades, modelamiento hídrico, metodologías para el estudio de ecosistemas, sistemas de información geográfica.

Aunando conocimientos en equipos de trabajo multidisciplinar, los estudiantes procedentes de los campos ambiental, agrícola, agronómico, económico y de ciencias de la información, llevaron a cabo sus trabajos en las temáticas de análisis del peligro glaciar, recopilación y análisis de información ambiental, estudios ambientales, socioeconómicos, ecológicos e hidrológicos y de valoración de servicios ecosistémicos.³

Estos estudios han servido hasta ahora como base para la formulación de Proyectos de Inversión Pública “verdes” relacionados con la conservación del agua a nivel local y con la mejora de las condiciones de vida de la población.

Para la gestión y la difusión de la información generada y recopilada se eligió la plataforma web del Sistema de Información Ambiental Regional de Ancash, SIAR Ancash, una potente herramienta de gestión ambiental regida por la Ley N° 28611 (Ley General del Ambiente) e implementada por el Gobierno Regional de Ancash con apoyo del

Instituto de Montaña. Entre sus objetivos está el de sistematizar, analizar, almacenar y hacer más transparente el acceso a la información en materia ambiental relativa a la región. Esto facilita los procesos de toma de decisiones a nivel técnico y político, otorgando una base científica para el desarrollo de futuras investigaciones, y permite, además, la intercomparación de estadísticas ambientales con las demás regiones del Perú y otros países, e informa y sensibiliza a la población al acercar la información de modo sencillo y fiable.

Estudios Realizados del 2015 al 2017

La lista de estudios conducidos por pasantes de la UNASAM en el proyecto “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña” ilustra el potencial que tienen las universidades públicas en zonas de montaña para contribuir a cerrar la brecha de información y de generar capacidades locales para la gestión de estos socioecosistemas.

Estudios Ambientales

- Inventario de la cobertura vegetal en la Mancomunidad Municipal del río Yanamayo.

³Los estudios completos se pueden consultar por temática en la web del Sistema de Información Ambiental Regional - SIAR Ancash: siar.minam.gob.pe/ancash.

- Propuestas para la recuperación de áreas y vegetación de bofedales degradados y alternativas de manejo ganadero en la cabecera de la Microcuenca San Luis - San Nicolás, Ancash.
- Estado de salud de los bofedales de las cabeceras de las microcuencas de San Luis y San Nicolás - Mancomunidad Municipal del río Yanamayo.
- Evaluación y caracterización de vegetación y suelo en un ecosistema de pradera nativa asociado a plantaciones forestales de pino en el centro poblado Llupa, sector Tayacoto, ámbito de la subcuenca Quillcay.
- Valoración económica del servicio ambiental de provisión hídrica de la quebrada Quillcayhuanca, mediante el método de valoración contingente. Huaraz, 2017.

Estudios Socioeconómicos

- Diagnóstico socioeconómico y posibilidades de desarrollo económico de la población de Carcas, distrito de Chiquián, provincia de Bolognesi, Ancash
- Diagnóstico socioeconómico de la actividad ganadera a cambios en el manejo del ecosistema del bofedal, en la cabecera de la microcuenca San Luis - San Nicolás, Ancash.

Estudios Hídricos y Agrológicos

- Disponibilidad de recursos hídricos en la subcuenca Pischcaragra, distrito de Aquia.
- Estudio de balance hídrico con modelamiento WEAP⁴ en la cuenca alta del río Pativilca, distrito de Aquia, provincia de Bolognesi.
- Estudio hidrológico para la determinación de la disponibilidad hídrica superficial para diversos escenarios en la cuenca del río Santa Catalina.
- Demanda hídrica con fines de riego y fertilidad de suelos en el centro poblado de Carcas, distrito de Chiquián, provincia de Bolognesi.
- Caracterización agrológica del suelo y del requerimiento hídrico del bloque de riego Challhuaruri.
- Inventario y caracterización de fuentes de agua superficial e infraestructura de riego en la subcuenca del río San Nicolás y las microcuencas Juncay, Pacchoc y Huagllapuquia, San Nicolás, Ancash.
- Estudio de la calidad del agua del río Pativilca - sector Aquia. Abril – agosto 2015.
- Evaluación de la calidad del agua en la Mancomunidad Municipal del río Yanamayo.
- Diagnóstico de la oferta y calidad del agua en la subcuenca del río Buín.
- Valoración socioeconómica del recurso hídrico para consumo humano en la subcuenca del río Buín.

Estudios de Evaluación del Peligro Glaciar

- Evaluación del nivel de peligrosidad de las lagunas proglaciares de la Cordillera Blanca, inventariadas por la UGRH-ANA, 2016.
- Modelamiento de posibles inundaciones por aluviones potenciales de las lagunas glaciares de Paclash/Milluacocha, Hualcacocha, Chequiacocha y Cochca, de la Cordillera Blanca.
- Modelamiento de posibles avalanchas de hielo usando el modelo MSF⁵ sobre las lagunas Hualcacocha, Chequiacocha y Cochca, de la Cordillera Blanca.

Gestión de la Información Ambiental

- Gestión de información meteorológica en el Centro de Investigación Ambiental para el Desarrollo CIAD – FCAM – UNASAM.
- Diseño y desarrollo de una aplicación móvil de carácter meteorológico para la región Ancash.

El Instituto de Montaña continúa desarrollando este enfoque como una estrategia de valor nacional y regional para incentivar en los jóvenes, especialmente quienes provienen de comunidades de montaña,

⁴Water Evaluation and Planning (WEAP) es software desarrollado por el Stockholm Environment Institute en su centro en los EE.UU., con el objetivo de ser una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos.

⁵Modified Single Flow Direction (MSF) model es software desarrollado por la Universidad de Zúrich para el modelamiento de inundaciones y avalanchas.

carreras dedicadas a la gestión de socioecosistemas de montaña. Una descripción más detallada de las investigaciones desarrolladas en el programa de pasantías se encuentra en el Sistema de Información Ambiental de la Región Ancash en <http://siar.minam.gob.pe/ancash/documentos/resumen-pasantias-adaptacion-cambio-climatico-instituto-montana>.

Conclusiones y Recomendaciones

El programa de pasantías universitarias del Instituto de Montaña nació como una parte del componente de gestión de la información dentro del proyecto “Asegurando el Agua y los Medios de Vida en la Montaña” y fue tomando cada vez más relevancia y peso a lo largo de los tres años de trabajo. El número de postulantes y de plazas disponibles fue en aumento y fueron 25 los jóvenes que a lo largo de tres promociones realizaron sus correspondientes estudios, varios de los cuales se convirtieron en tesis de grado.

Asimismo, la implicación de instituciones regionales como INAIGEM y la Universidad de Texas apoyó y diversificó la temática de estudio y dio la oportunidad a los jóvenes de contar con un asesoramiento especializado en modelamiento del peligro glaciar y ecología.

Desde el Instituto de Montaña se ha comprobado el gran beneficio de la formación de equipos multidisciplinares en términos de cooperación, capacitación mutua y toma de contacto con conocimientos y metodologías ajenas a sus áreas de conocimiento, lo que proporciona a los beneficiarios una valiosa experiencia. También se constató la excelente generación de información y de capacidades que el programa supone en relación a los recursos invertidos siempre y cuando exista una buena coordinación y seguimiento por parte del TMI.

Es por ello que hemos incorporado como prioridad institucional la continuidad de las pasantías y una búsqueda de mejora continua del modelo que sea capaz de integrar colaboraciones entre el TMI y empresas privadas u otras instituciones y teniendo como principal aliada a la UNASAM. Asimismo, se plantea la réplica en otras regiones y universidades públicas del país y socias extranjeras interesadas en llevar a cabo la experiencia.

Resaltamos la importancia de la implicación y compromiso de las universidades para brindar apoyo tanto técnico como institucional durante el programa y la necesidad de colaboración con entidades de financiación que crean y apuesten por las potencialidades que ha demostrado.

Referencias

- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. y Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19–33.
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R. I., Halloy, S., Salgado, S., Ortiz, E. y Becerra, M. T. (Eds.) (2012). *Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales - Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación*. Véase “Avances en el establecimiento de la Red Andina de Monitoreo en los Andes tropicales”, pp. 34-49. Lima-Quito, Red Gloria-Andes.
- Gallopín, G. C., Gurman, P. y Maletta, H. (1989). Global impoverishment, sustainable development and the environment: A conceptual approach. *International Social Science Journal*, 121, 375-397.
- IPCC. (2014a). Mimura, N., Pulwarty, R. S., Duc, D. M., Elshinnawy, I., Redsteer, M. H., Huang, H. Q., Nkem, J. N. y Sánchez Rodríguez, R. A. [Chapter 15] Adaptation planning and implementation. En Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E.,... White, L. L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 869-898. Cambridge y New York, Cambridge University Press.
- IPCC. (2014b). Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R. y Vicuña, S. [Chapter 27] Central and South America. En Barros, V.R., Field, C. B., Dokken, D. J., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Bilir, T. E.,... White, L. L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change, 1499-1566. Cambridge y New York, Cambridge University Press.

Recharte, J., Arévalo, R. y Glave, M. (2003). *Islas en el cielo: Conservación de ecosistemas, afirmación de la cultura y prosperidad en las montañas del Perú*. Lima, Instituto de la Montaña.

Rhoades, R. E. (2007). *Listening to the mountains*. Dubuque, Iowa, Kendall/Hunt Publishing Company.

Torres G., J. (2015). Experiencias de adaptación al cambio climático, los conocimientos ancestrales, los conocimientos contemporáneos y los escenarios cualitativos en los Andes. Alcances y límites (Perú). *Apuntes de InvestigAcción*, 3, 1-21. Lima, Soluciones Prácticas.

Guía para Autores

La *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña* publica artículos científicos originales e inéditos en las áreas de glaciología y ecología de ecosistemas de montaña, así como en disciplinas afines de ciencias de la tierra, ciencias biológicas y ciencias sociales. Los trabajos recibidos son sometidos a una evaluación doble ciego por revisores pares externos al INAIGEM, según criterios de calidad profesional.

Las pautas principales para manuscritos enviados a la *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña* del INAIGEM son las siguientes:

- a) Temática relacionada con glaciares y ecosistemas de montaña en los Andes, directamente y por medio de disciplinas afines como la geología, geografía, meteorología, botánica, zoología, antropología, etc.
- b) Un límite máximo de 10,000 palabras, contando todos los textos (el resumen en castellano, abstract en inglés, las referencias, las leyendas de figuras, etc.).
- c) Texto en castellano o inglés.
- d) Resumen en castellano y abstract en inglés (podemos ayudar a refinar la versión no nativa) de un máximo de 300 palabras.
- e) Cinco palabras clave (en los dos idiomas).
- f) Formato profesional, como el de muchas revistas técnicas en el mundo, pero con mayor flexibilidad, sin requisitos muy estrictos, lo que favorece la diversidad del material tratado en sus trabajos.
- g) Ser dividido en secciones que incluyen una introducción; la metodología, los datos y los resultados, si son pertinentes; una discusión y/o conclusión y breves agradecimientos antes de la lista de referencias citadas.
- h) Una lista de referencias citadas que contenga todas las obras citadas en el texto y ninguna otra.
- i) Referencias completas en orden alfabético por el apellido del primer autor, en estilo APA (American Psychological Association), con precisión y consistencia. Como ejemplos se puede usar las listas de Referencias de los artículos publicados en los tres números previos de la *Revista*.
- j) Fotos y figuras (formato JPG), tablas (formato Word o Excel), mapas y otros gráficos (formato PDF) muy nítidas y legibles.
- k) Pueden enviar cualquier pregunta al correo electrónico del editor: swegner@inaigem.gob.pe.



EL PERÚ PRIMERO

