



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° 5
Diciembre 2018
Huaraz - Ancash



10 años
MINAM

Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Año 3, Número 5 – Diciembre 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 5 – Diciembre 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 (Departamento Académico de Humanidades - Sección Geografía, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima)

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

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

Dr. Hildegardo 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 INAI GEM, según criterios de calidad profesional.

Aunque la **Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña** no está indizada todavía, es nuestra meta cumplir con las pautas para indizarla.

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 INAI GEM.

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
Diciembre 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 Coropuna, Cordillera Ampato, Arequipa, con vicuñas (*Vicugna vicugna*) adelante y un antiguo flujo de lava en el medio campo (A. Santiago); (derecha) Quenual (*Polylepis* sp.) con bromelias, Quebrada Llaca, Huaraz, Ancash (H. Valverde); (abajo) *Senecio comosus*, Quebrada Llaca, Huaraz, Ancash (D. Ocaña); (izquierda) Sapo (*Rhinella* sp.), Mesapampa, Chiquián, Bolognesi, Ancash (D. Ocaña). **Foto de la contraportada:** Nevado Huascarán (Norte y Sur), Cordillera Blanca, Ancash (E. Loarte).

Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

INAIGEM

Año 3, Número 5, Diciembre 2018

CONTENIDO

Editorial	7
1. Sedimentological analysis of Paleolake Jircacocha, Cojup Valley, Cordillera Blanca, Peru <i>Análisis sedimentológico del Paleolago Jircacocha, Quebrada Cojup, Cordillera Blanca, Perú</i> Chimira N. Andres, Carolyn H. Eyles, Harrinson Jara and Rodrigo Narro-Pérez	9
2. Sedimentology and structure of the Lake Palcacocha laterofrontal moraine complex in the Cordillera Blanca, Peru <i>Sedimentología y estructura del complejo de la morrena laterofrontal de Laguna Palcacocha, Cordillera Blanca, Perú</i> David Bowman, Carolyn H. Eyles, Rodrigo Narro-Pérez and Roque Vargas	27
3. Efecto de la estacionalidad climática y sus implicancias para el manejo de un pastizal de puna en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú <i>Seasonal climatic effect and its implications for management of a puna rangeland in the Cordillera Blanca, Ancash, Peru</i> Beatriz Fuentealba, Dennys Villacaqui, Ángel Mendoza y Luis Armas	43
4. Variación del pH en aguas superficiales debido a drenajes ácidos de roca en la subcuenca Quillcay, Huaraz, Ancash <i>Variation of pH in surface waters due to acid rock drainage in the Quillcay subbasin, Huaraz, Ancash</i> Gabriel Martel, Juan Torres y Harrinson Jara	57
5. Evaluación de la artropodofauna asociada a los bosques de <i>Polylepis</i> de la Región Puno, Perú <i>Evaluation of the arthropodofauna associated with <i>Polylepis</i> forests of the Puno Region, Peru</i> Anahí Oroz-Ramos, Abdhiel Bustamante-Navarrete, Jhony Farfán-Flores, Óscar Santander-Azpilcueta y Ana Rodríguez-Veintemilla	69
6. Lineamientos específicos para la formulación de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña del Perú <i>Specific guidelines for formulation of the proposal for the National Policy for Glaciers and Mountain Ecosystems of Peru</i> Peter J. Oesterling Jr.	81
Guía para Autores	96

EDITORIAL

Fronteras de la Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Los mejores especialistas, actuales y futuros, en estudios de glaciares y ecosistemas de montaña tendrán la responsabilidad de determinar nuevas fronteras de la investigación científica. Aquí pretendemos solamente indicar unos temas que nos parecen importantes y que tienen un gran potencial para ser desarrollados.

Aunque puede parecer algo anticuada y de utilidad limitada, la investigación histórica de la condición de los glaciares y ecosistemas de montaña en los últimos siglos tiene mucho material por revisar. El acceso a publicaciones del siglo XX en diversos idiomas es, a menudo, necesario para los estudios de cambios climáticos y ambientales, especialmente con relación al registro fotográfico de estos cambios. Algunas revistas científicas antiguas son accesibles en forma digital en internet, pero hay muchas más que no han sido digitalizadas todavía, estando disponibles solamente en bibliotecas especializadas; además, el proceso de escanear libros, tesis, revistas e informes antiguos (p. ej. Trask, 1952) es largo, diverso y no necesariamente cubre muchas fuentes y materiales regionales y locales. Aparte del imprescindible inglés, el alemán y el francés son idiomas importantes para estudios glaciológicos en los Alpes, los Andes y otras cordilleras del mundo. Para las cordilleras Blanca y Huayhuash del Perú, algunas de las primeras noticias científicas se publicaron en alemán en un extenso libro, *Die Weisse Kordillere* (Borchers, 1935), y en revistas especializadas publicadas en Múnich (p. ej. Borchers, Hoerlin y Schneider, 1933; Kinzl, 1936; Kinzl y Schweizer, 1941), generalmente en letra gótica (Fraktur) que presenta un desafío adicional para su lectura.

La digitalización de materiales impresos (libros, artículos, informes y tesis) para el acceso, indización y clasificación de acuerdo a su utilidad para nuevos estudios abrirá el uso a décadas de estudios previos. Para el manejo más eficiente de la bibliografía electrónica moderna, sería valioso contar con técnicas y servicios de búsqueda bibliográfica proactiva, basado en la indicación de palabras clave de interés. También, servicios nuevos pueden alertar a los investigadores acerca de nuevos artículos sobre los mismos temas en el momento de su primera publicación electrónica.

Para las dos especialidades de glaciares y ecosistemas de montaña hay una necesidad de captar la totalidad (*the big picture*) del área geográfica de interés, sea una subcuenca, una cordillera o todas las cordilleras del Perú u otras partes de los Andes. Claramente, la teledetección satelital es la herramienta esencial para cubrir miles de kilómetros cuadrados y determinar las áreas de los glaciares y las cuencas hidrográficas. Sin embargo, en el futuro cercano se necesitará mejor definición y diferenciación, si es posible, para precisar ciertos aspectos como la variación del espesor del hielo de diferentes partes de un glaciar, o en la variación de la cobertura vegetal de diferentes partes de una subcuenca. En conjunto con esta escala macro, sería valioso contar con cantidades de sensores pequeños y económicos para un registro en tiempo real, colocados en lugares estratégicos de las subcuencas para la medición de variables climáticas y ambientales (p. ej. temperatura y humedad del aire o del suelo, o la temperatura y acidez del agua), dando importantes aportes para la meteorología, hidrología y ecología.

El campo amplio de la radioglaciología (para un resumen de las técnicas véase Solorza, 2012) tiene mucho potencial para ampliar nuestro conocimiento de las grandes masas de hielo y su entorno. Usando botes y equipos de sonar, se puede realizar batimetría para determinar las profundidades de las lagunas glaciares y desarrollar una representación en tres dimensiones. A pesar de las irregularidades del fondo de la laguna, se puede calcular con relativa precisión el verdadero volumen de agua, empleando programas matemáticos especializados. En contraste, la logística de desplazamiento para medir glaciares es mucho más difícil que hacer batimetría desde

un bote en una laguna con espejo de agua uniforme. Medir el espesor del hielo de glaciares es aún más difícil por la irregularidad de la superficie, tal como del lecho de roca de la base. Es posible medir el espesor usando georadar (GPR – *ground penetrating radar*), radio eco sondaje (RES) o tecnología LiDAR (del inglés, *laser imaging, detection and ranging*), transportada por trineo, dron o helicóptero (y, tal vez, superdrones en el futuro). Por la consistencia del hielo, se puede penetrar hasta tres kilómetros de profundidad, como se ha hecho en las “placas de hielo” en la Antártida (p. ej. Uribe et al., 2016), o para detectar el gran cráter de impacto debajo del hielo de Groenlandia (Kornei, 2018). Se mide la superficie de glaciares con teledetección o GPS y, teniendo las medidas de la superficie y el fondo, teóricamente se puede calcular el volumen del hielo. Teniendo el volumen, se necesita estimar la densidad del hielo para poder calcular el volumen equivalente de agua (véase p. ej. Silverio, 2018) para fines del potencial uso para la agricultura, el consumo humano y la hidroeléctrica.

Para el estudio integral de las cuencas hidrográficas, se debe avanzar con la caracterización de ecosistemas de montaña con base en la teledetección especializada utilizando sensores e índices apropiados para diferenciar diversos tipos de comunidades de plantas, por ejemplo, bofedales (cf. García et al., 2016) o tipos de bosques. Por supuesto, será importante hacer una verificación minuciosa en el terreno (*ground truthing*) de algunas quebradas escogidas (cf. Rosario, 2018) para poder comparar la realidad en el campo con la determinación por teledetección y hacer las correcciones o refinamientos necesarios para mejorar la interpretación de las imágenes remotas. Además, la observación periódica de unas subcuencas podría servir para identificar especies de plantas y animales ocupando nuevos nichos altitudinales con el aumento de la temperatura.

Un tema de creciente importancia, visto que el retroceso glaciar expone grandes áreas de roca a los efectos de la oxidación y erosión (Eddy et al., 2017), es el monitoreo y la bioremediación de las aguas fluviales, usando nuevas técnicas (p. ej., Zimmer et al., 2018) para reducir el impacto biológico negativo de los drenajes ácidos de roca (cf. Martel et al., en este número). También, la recuperación de tecnologías ancestrales, tal como la construcción de represas de limo para crear y sostener bofedales (Lane, 2017), combinado con la siembra y cosecha de agua, pueden ofrecer soluciones parciales en áreas de escasez de agua y pastos.

El Editor

Borchers, P. (Ed.). (1935). *Die weisse Kordillere*. Berlín, Verlag August Scherl GmbH.

Borchers, P. et al. (1933). Die Forschungsreise des D. u. Ö. A.-V. in die Cordillera Blanca (Peru). *Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, 64, 1-28.

Eddy, A. M. et al. (2017). Exploring patterns and controls on the hydrochemistry of proglacial streams in the upper Santa River, Peru. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 41-57.

García, J. L. et al. (2016). Mapeo de bofedales en cabeceras de Cuenca mediante imágenes de los satélites Landsat. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1, 81-97.

Kinzl, H. (1936). Gletscherseeausbrüche [es decir, GLOFs] in den peruanischen Anden. *Der Bergsteiger*, VII, 231-234.

Kinzl, H. et al. (1941). Die Anden-Rundfahrt des Deutschen Alpenvereins nach Peru im Jahre 1939. *Zeitschrift des Deutschen Alpenvereins*, 72, 1-24.

Kornei, K. (2018). Enormous impact crater spotted in Greenland under glacial ice. *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO110367>. Published on 20 November 2018.

Lane, K. (2017). Water, silt and dams: Prehispanic geological storage in the Cordillera Negra, north-central Andes, Peru. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2, 41-50.

Rosario, A. M. (2018). Recuperación de servicios ecosistémicos de áreas afectadas por el aluvión de 2012 en la microcuenca Santa Cruz, Huaylas, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 4, 77-96.

Silverio, W. (2018). Impacto del cambio climático en el nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Perú) y en el recurso hídrico. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 4, 43-56.

Solorza, R. (2012). Literature review of glaciers monitoring from remote sensing techniques. Seminar final report. Universidad Nacional de Córdoba, Instituto Gulich – CONAE.

Trask, P. D. (1952). The alluvion [sic] problem in the Cordillera Blanca of Peru. (October 1952; 86 páginas mecanografiadas). Report to the Republic of Peru. Publicado en castellano en 1953 con pocas fotos como “El problema de los aluviones en la Cordillera Blanca”, *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 70, 3-75.

Uribe, J. et al. (2016). Descubrimiento del lago subglacial CECs en Antártica occidental. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1, 51-58.

Zimmer, A. et al. (2018). 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. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 4, 57-76.

Sedimentological Analysis of Paleolake Jircacocha, Cojup Valley, Cordillera Blanca, Peru

Análisis Sedimentológico del Paleolago Jircacocha, Quebrada Cojup, Cordillera Blanca, Perú

Chimira N. Andres¹, Carolyn H. Eyles¹, Harrinson Jara² and Rodrigo Narro-Pérez¹

¹*School of Geography and Earth Sciences, McMaster University, Hamilton, ON, Canada*

²*Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Huaraz, Ancash*

Abstract

The impact of global warming is especially evident within high altitude regions of the Cordillera Blanca in Peru where Andean valley glaciers are rapidly receding. Due to increased melt as glaciers recede, large pro-glacial lakes, impounded by unstable frontal and lateral moraine dams, are accumulating in front of glaciers. These moraine dams, confined within narrow deglaciated valleys, are prone to failure and can release catastrophic glacial lake outburst floods (GLOFs). Floods pass rapidly through the narrow valleys eroding preexisting sediment and depositing materials as they wane in energy. It is important to understand the nature and spatial distribution of sediments now infilling these narrow deglaciated valleys as they exert critical control on the movement of surface water and groundwater, important resources for local communities. This paper documents valley infill sediments exposed in an eight-meter-high stream bank outcrop in the Cojup Valley, close to the city of Huaraz in the Cordillera Blanca. The outcrop exposes sediments deposited in a debris-dammed lake, Paleolake Jircacocha (PLJ) that formerly occupied the middle portion of the valley. Within the outcrop, seven facies zones were delineated, dominated by massive, crudely-bedded gravels (Gms), trough cross-bedded sands and gravels (St/Gt), and deformed silts and clays (Fd). These facies zones were further grouped into four facies associations that allowed interpretation of depositional processes and paleoenvironmental conditions that transitioned from a delta top/fluviol system (FA1), into a lacustrine system (FA2), a GLOF-dominated system (FA3), and finally a lake drainage-fluviol system (FA4). This research establishes the characteristics of sediments infilling the mid-portion of a deglaciated valley and serves as a foundation for development of more comprehensive sedimentological and landsystem models that may be used to enhance understanding of the depositional history and hydrogeological

significance of valley infill sedimentary successions formed in rapidly deglaciated regions.

Keywords: *Sedimentology of valley infills, Cojup Valley, Cordillera Blanca, Paleolake Jircacocha, facies associations in deglaciated tropical valleys*

Resumen

El impacto del calentamiento global es especialmente evidente en las regiones de gran altitud de la Cordillera Blanca en Perú, donde los glaciares andinos de valle están retrocediendo rápidamente. Debido al aumento del deshielo y el retroceso de los glaciares, grandes lagos pro-glaciares están formando en frente, retenidos por inestables diques de morrenas frontales y laterales. Estos diques morrénicos, confinados dentro de angostos valles desglaçados, son propensos a fallar y pueden liberar GLOFs (glacial lake outburst floods) catastróficos. Tales aluviones atraviesan rápidamente estos valles angostos, erosionando sedimento preexistente y depositando materiales a medida que disminuyen en energía. Es importante entender la naturaleza y la distribución espacial de los sedimentos que ahora rellenan estos angostos valles desglaçados porque ejercen un control crítico sobre el movimiento de las aguas superficiales y subterráneas, las cuales son recursos importantes para las comunidades del área. Este artículo documenta sedimentos de relleno de valle expuestos en un afloramiento de ocho metros de altura en un costado de la Quebrada Cojup, cerca de la ciudad de Huaraz en la Cordillera Blanca. Este afloramiento expone sedimentos que fueron depositados en un lago represado por una morrena, el paleolago Jircacocha que anteriormente ocupaba la parte media de la quebrada. Dentro del afloramiento, se delinearon siete zonas de facies, dominadas por gravas masivas en capas toscas (Gms), arenas y gravas con estratificación entrecruzada (St/Gt) y limos y arcillas deformadas (Fd). Estas zonas de

facies se agruparon en cuatro asociaciones de facies que permitieron la interpretación de los procesos deposicionales y las condiciones paleoambientales que transicionaron de un sistema delta alto/fluvial (FA1), a un sistema lacustre (FA2), a un sistema GLOF-dominado (FA3) y finalmente a un sistema de drenaje lacustre-fluvial (FA4). Esta investigación establece las características de los sedimentos que rellenan la parte media de un valle desglaciado y sirve como base para el desarrollo de modelos sedimentológicos y de landsystems más amplios que pueden usarse para mejorar la comprensión de la historia deposicional y la importancia hidrogeológica de sucesiones sedimentarias de relleno de valle que están formando rápidamente en regiones desglaciadas.

Palabras clave: *Sedimentología de rellenos de valles, Quebrada Cojup, Cordillera Blanca, Paleolago Jircacocha, asociaciones de facies en valles tropicales sin cobertura glacial*

Introduction

An unprecedented amount of evidence suggests that rapid climatic shifts are occurring and are impacting the volume and extent of glaciers on a global scale (Vaughan et al., 2013; NSIDC, 2017). This impact is especially evident in temperate and tropical mountainous regions where glaciers are rapidly receding, and large pro-glacial lakes are forming along the ice margins. Many of these lakes are impounded by unstable frontal and lateral moraine dams, which are prone to failure and pose serious threats to local communities (Carey, 2010). The Cordillera Blanca (CB) in Peru is considered the most heavily glacierized tropical mountain range in the world and serves as an important freshwater reservoir used for irrigation, drinking water, and hydroelectric power by the surrounding communities (Figure 1; Ames and Francou, 1995). The highly dynamic CB glaciers allow swift sediment transport and depositional processes to occur, particularly in the steeply sloping valleys in which these glaciers and their fringing lakes lie (Kaser, Ames and Zamora, 1990). The threat of moraine dam failure, which can produce glacial lake outburst floods (GLOFs), is extremely serious for communities lying adjacent to the CB (Vilímek et al., 2005; Somos-Valenzuela et al., 2016).

Glacial erosion and deposition produce distinctive landforms while changing the appearance and

composition of the land as glaciers advance and retreat. As a glacier passes across uneven terrain, it can carve the substrate over which it is moving to form closed topographic depressions (Cook and Swift, 2012). These basins are important as they can host lakes that serve as ‘traps’ for sediment moving through the valley and can preserve critical paleoenvironmental information. The CB terrain is distinctive in its valley geometry, which is characterized by extremely steep and linear valley walls (Figures 2 and 3). This geometry is a function of the region’s tectonic and glacial regimes and directly influences the sedimentary processes acting to infill the valleys as they are deglaciated. Glaciers reached their maximum extent in these valleys during the Late Glacial period around 13 – 14 Ka (Bromley et al., 2009) and retreated to near their modern position by the Little Ice Age (Solimina et al., 2007). Unfortunately, relatively little is known about the sediments infilling these deglaciated valleys or the timing or nature of the processes that deposited them. However, these sediments exert a critical control on the movement of surface and groundwater through the valleys, and on the stability of material that has accumulated along the valley walls. Enhanced understanding of the nature of the valley infill sediments and the processes that controlled their deposition will therefore allow better prediction of hazardous events in this GLOF-dominated region and better planning of water resource availability and protection for local communities.

Study Site

This paper describes the characteristics of sediments that accumulated within a former lake ponded within the Cojup Valley, which drains westward from the CB (Figure 1). The study site lies approximately 15 km directly northeast of the city of Huaraz, Peru in the southern part of the Santa River Basin (9° 26’ 51.7” S 77° 25’ 16.5” W; Figure 1). Huaraz is the capital city of the Ancash region situated in the Callejón de Huaylas, an inter-Andean valley. The Cojup Valley is a 13.5 km long deglaciated valley with a distinctive linear longitudinal profile and U-shaped cross section (Figures 2 and 3). It currently hosts one ice-contact proglacial lake (Lake Palcacocha) and contained one additional lake (Paleolake Jircacocha; Figure 1B) prior to 1941. The water for both lakes comes from the Palcaraju and Pucaranra glaciers. Proglacial Lake Palcacocha (~4562 masl; UGRH, 2010) is located immediately below the present glacier tongue, while

the main investigation site for this study, within the basin of Paleolake Jircacocha (PLJ), is situated eight kilometers down-valley from Lake Palcacocha (Figure 1C).

The earliest documented evidence for the existence of PLJ was in 1932 when it was visited by Austrian geographer and mountain researcher, Dr. Hans Kinzl (Figure 1B; Wegner, 2014). PLJ was approximately 460 m long, 270 m wide and dammed on its downstream end by an accumulation of rockfall debris, subsequently overlain by talus deposits from the steep valley walls (Figure 3; Vilímek et al., 2005; Tacconi Stefanelli et al., 2018). At present, PLJ stands

as a drained, partially sediment infilled basin (Figure 1C) and the former shoreline of PLJ (at an elevation of approximately 4130 masl) can be identified in the valley from the position of sediment exposures and vegetation changes which suggest a former water depth of at least 30 m (Figure 2; Vilímek et al., 2005).

On December 13, 1941, a GLOF occurred in the Cojup Valley that may have been initiated by an avalanche from the Palcaraju glacier into Lake Palcacocha (Carey, 2010). This created a massive wave in Lake Palcacocha that overtopped and breached the debris dam. The released water hurtled down-valley travelling at 1 m/s while carrying blocks of ice, large

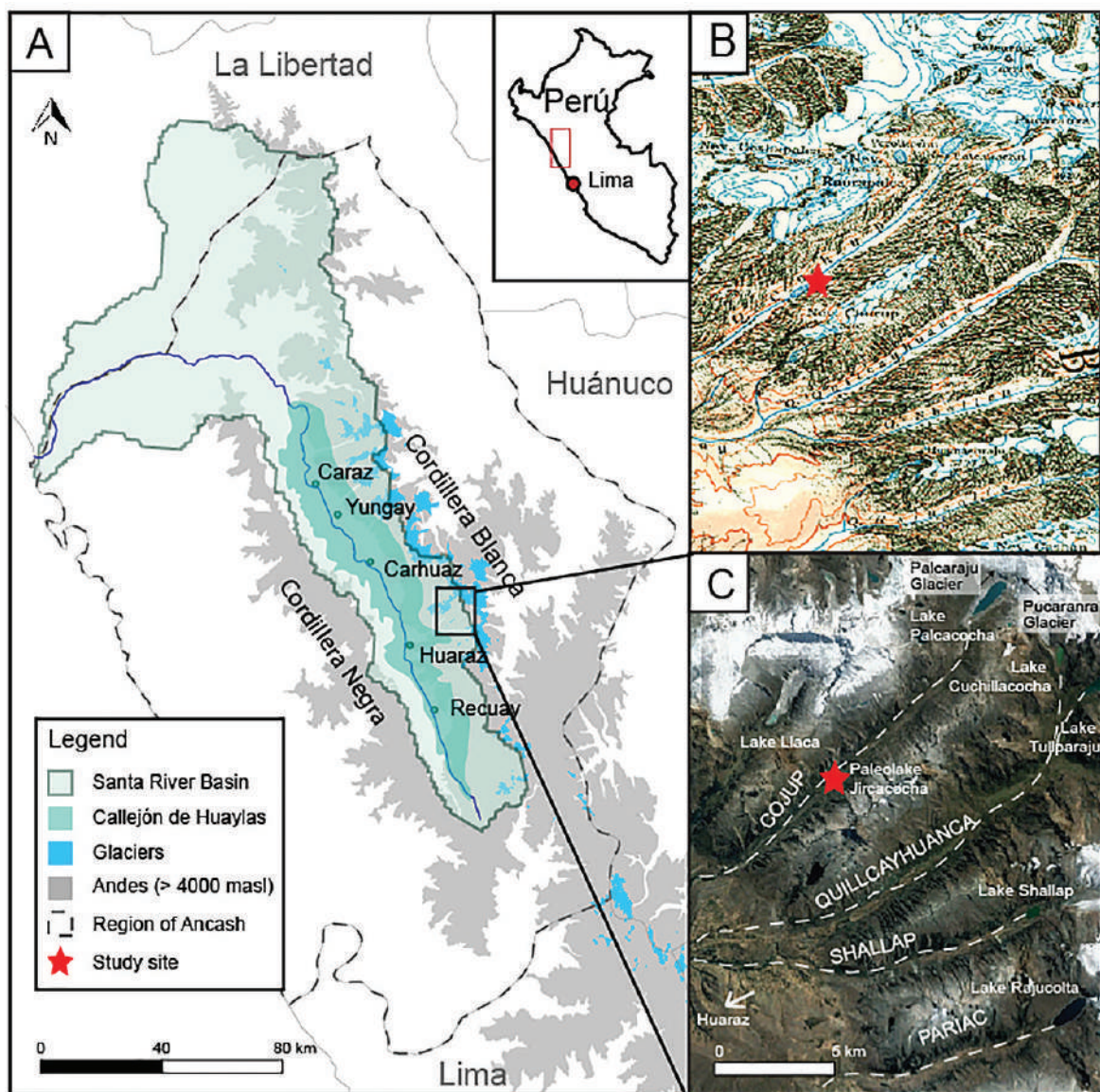


Figure 1. Location of the study area within the Cojup Valley, Cordillera Blanca, Peru. (A) Map of the northwest Andean region of Peru with glacierized areas and cities identified. (B) The Deutschen und Österreichischen Alpenvereins Expedition Map of 1934 is the earliest evidence for the existence of Paleolake Jircacocha (PLJ) recorded in 1932 by the Austrian geographer and mountain researcher, Dr. Hans Kinzl. The detail shown here is from the DAV map of 1950. The study site, Paleolake Jircacocha, is marked with a red star. (C) LANDSAT 2018 satellite imagery of the study region including Cojup and adjacent valleys and glacial lakes. The position of Paleolake Jircacocha is marked with a red star.

boulders, slope debris and mud (Wegner, 2014). This high velocity flood event entered Paleolake Jircacocha some eight kilometers down-valley, entraining an additional 3.6 million cubic meters of water to the 10-12 million cubic meters of the original flood volume from Lake Palcacocha, breaching its debris dam (Vilímek et al., 2005; Somos-Valenzuela et al., 2016; Tacconi Stefanelli et al., 2018). Within 15 minutes, the GLOF, carrying large volumes of mud and debris, reached Huaraz, burying large areas of the town and killing at least 1800 inhabitants (Wegner, 2014). Today, the area occupied by the former PLJ is valley floor pastureland crossed by a river draining Lake Palcacocha and rimmed by steep talus slopes. The failed former dam of Paleolake Jircacocha is visible at the down-valley end of the lake basin (Figure 2A). Well-sorted, fine-grained lacustrine and fluvial sediments deposited within the former lake are well exposed in an eight-meter-high outcrop section on the up-valley side of the basin (Figure 2B). These sediments are the main focus of this investigation. Unfortunately, there are no data regarding the age of these deposits or the nature of sediments underlying the exposed outcrop.

Deglaciated Valleys in the Cordillera Blanca: Formation of Valleys and Basins

Alpine tropical glaciers produce distinctive landforms as a result of glacial erosion and deposition, changing the composition of the landscape during periods of ice advance and retreat. In the CB, as valley glaciers passed across the uneven terrain, they carved through the bedrock substrate forming linear valleys and closed topographic depressions that are widespread in this northeast region of the Andes. The form and orientation of the linear valleys is strongly influenced by the tectonic evolution of the region and they lie parallel to E-W trending lineaments that developed perpendicular to the Cordillera Blanca normal fault (Wise and Noble, 2003; Schellart, 2008; Margirier et al., 2018). These lineaments form structural and lithologic weaknesses in the crustal rocks that have been exploited by glacial and fluvial erosion processes and mass wasting. The U-shaped Cojup Valley formed in this way, with the basin in which the former PLJ lay having developed subglacially (Figure 3). The sedimentary infilling of these basins strongly influences the hydrogeology

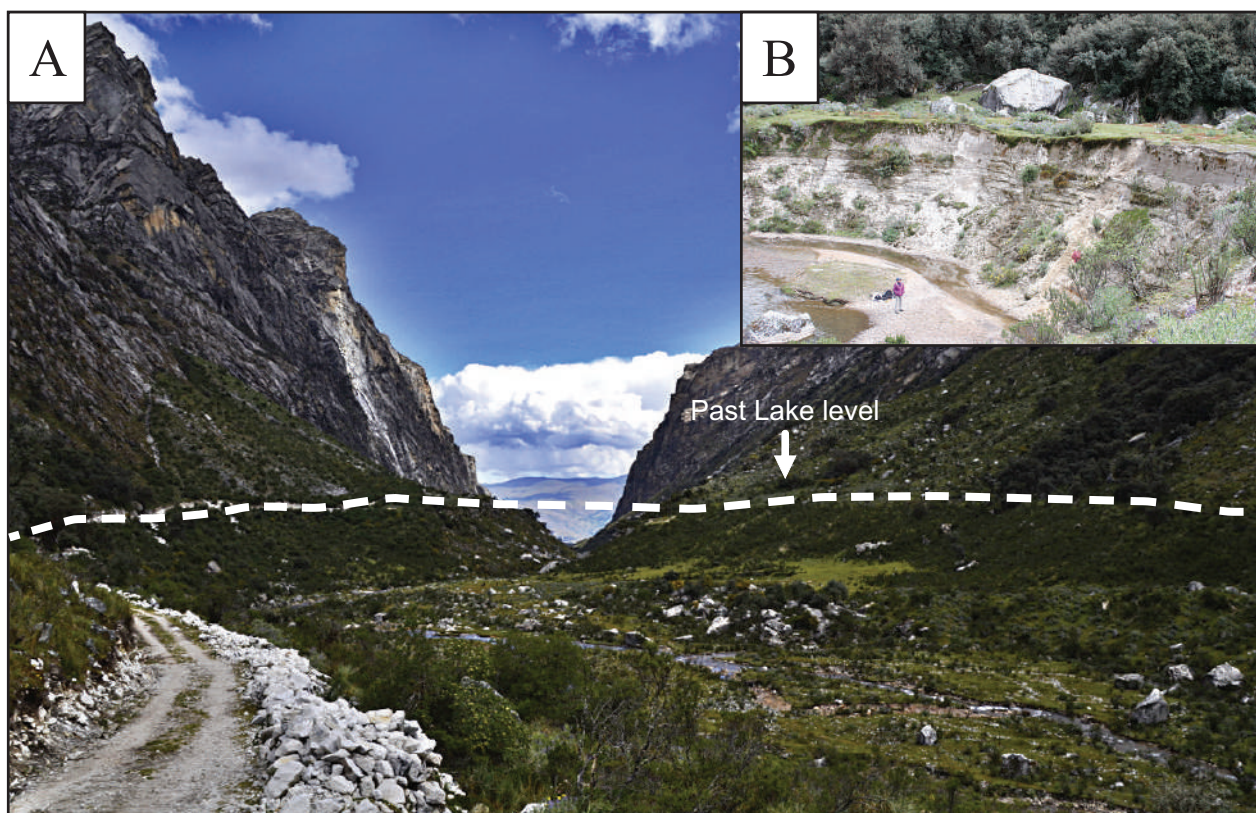


Figure 2. The former lake basin of Paleolake Jircacocha in the Cojup Valley (looking down-valley). (A) The distinct change in vegetation color (dark green below and lighter green with exposed rock above) along the valley walls indicates the past lake level. (B) Eight-meter-high outcrop of PLJ sediments located at the up-valley margin of the former lake. Photos: C. Andres.

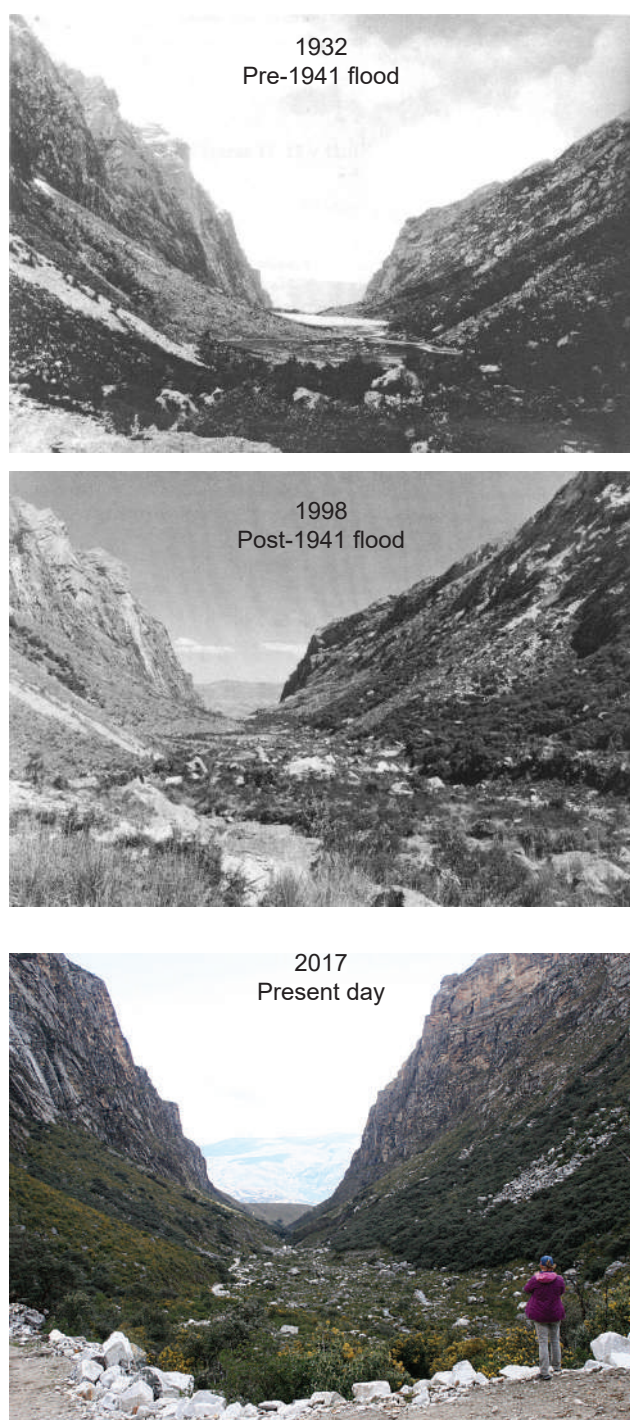


Figure 3. U-shaped Cojup Valley and location of Paleolake Jircacocha basin in 1932 (top; foto Hans Kinzl), 1998 (middle; foto Alton Byers) and 2017 (bottom; foto C. Andres). Top and middle images from Byers, 1999, Figures 9 and 10. Used with permission.

of local glaciolacustrine and glaciofluvial systems (Benn and Evans, 1996).

The processes of subglacial erosion have led to the development of irregular longitudinal profiles along the linear valleys that dissect the CB (Figure 4). These irregular long-valley profiles consist of alternating terraced steps and basins that are typically occupied by lakes or have been sediment-filled. Some terraces

clearly coincide with variations in bedrock type and resistance to erosion (Hambrey and Ehrmann, 2004). The Cojup Valley is characterized by a series of bedrock steps or ‘terraces’ subsequently infilled by fluvial or lacustrine sediment; Paleolake Jircacocha formerly lay in one of these basins (Figure 4).

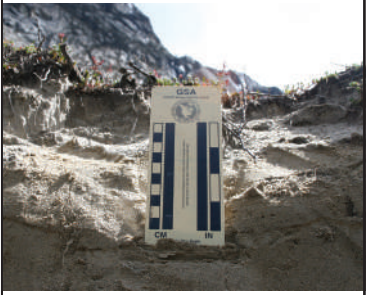





The ability of ice masses to erode bedrock and to create basins in linear valleys such as the Cojup Valley also generates large quantities of sediment for transport and deposition (Alley et al., 1997). Together, the processes of subglacial erosion and deposition are capable of producing complex glacier-bed profiles consisting of multiple basins and irregular infillings, of differing origin and relative age.

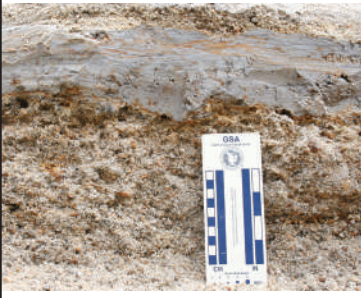


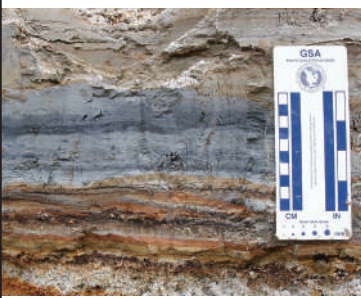
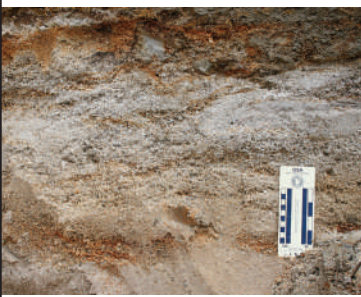
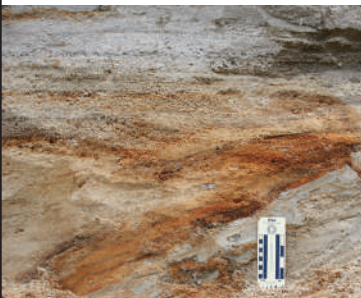
Methodology

This paper focuses on the description and interpretation of deglaciaded valley infill deposits of PLJ exposed on an active stream bank in the Cojup Valley (Figure 5). These deposits formed sometime after the Late Glacial maximum, during the Holocene, although no data on the age of these sediments are available. Fieldwork involved the documentation of sediment characteristics, sediment facies architecture, and landform characteristics to enable reconstruction of the depositional history of this portion of the Cojup valley (Eyles, Eyles and Miall, 1983). The eight-meter-high stream bank outcrop was cleaned of surface debris before detailed sedimentological logging of the exposed sediments following the methodology outlined by Eyles et al. (1983; Figure 6).

Facies are mappable units of rock or sediment that have specified physical characteristics, composition, formation, and various other attributes. The Swiss geologist Amanz Gressly introduced the term facies in 1838 as he demonstrated regular lateral facies transitions along beds, which he interpreted to record spatially changing environmental conditions (Cross and Homewood, 1997). In this study, ten different facies types, distributed across seven stratigraphic zones, were identified in the eight-meter-high outcrop (Table 1). These facies types were described using a standard facies coding scheme (Eyles et al., 1983; Table 1). Sediment texture (grain size), clast size, lithology and shape were recorded, as well as sedimentary structures (including soft sediment deformation structures), bed thicknesses, and the lateral continuity of individual units. Paleocurrent

Table 1. Stratigraphic zones and facies types identified in the Paleolake Jircacocha outcrop (see Figure 6 for facies codes). All photos: C. Andres.

Zones	Zone Thickness	Facies Codes	Paleoflow Direction	Facies Descriptions	Facies
A	1.75 m	Sr, Sd Sh	None	Deformed sands with convolute lamination, flame, and dewatering structures.	
				Rippled and deformed sands with convolute lamination, flame, and dewatering structures.	
				Fining upward succession of poor to well-sorted, coarse to fine-grained, horizontally laminated sands. Scattered clasts up to 5 mm diameter in coarse-grained sands at base.	
B	0.25 m	Gms	None	Massive to crudely bedded gravel with coarse sand matrix. Subrounded clasts ~5-10 cm diameter.	
C1	0.6 m	Sr, Fd Sm	SW	Laminated and deformed silts and clays with massive and rippled sand. Sands appear red in color due to oxidation of iron minerals. Pervasive soft sediment deformation structures.	
					

Zones	Zone Thickness	Facies Codes	Paleoflow Direction	Facies Descriptions	Facies
C2	0.75 m	Fd, Sr, Sd Gm, Sm Fd	Variable (average direction is to the southwest)	Interbedded units of massive gravel with subrounded clasts <1 cm diameter, massive coarse-grained sands, rippled sands and fines with pervasive soft sediment deformation structures	
C3	1.20 m	Fm, Fd, Sr Gms Sh, Sm,	SW	Horizontally laminated and massive coarse-grained sand interbedded with crudely stratified gravel, and massive/deformed clays (beds ~3-6 cm). Thin units of rippled fine sand with coarse sand pockets and small gravel foresets.	
D	1.00 m	Sr, St/Gt Fd, Fl, Sd	SW	Laminated and deformed fine-grained silts and clays overlain by massive, rippled, and trough cross-bedded sands containing clasts. Individual beds up to 7 cm thick. Soft sediment deformation structures are common.	
E	0.35 m	St/Gt Fl	SW	Coarsening upwards unit consisting of laminated fines passing into medium-grained trough cross-bedded sands and gravels (sets 15-20 cm thick). Clay rip-up clasts are common in sand and gravel facies.	
F	0.85 m	Gm, St Fl, Sr	S	Coarsening upwards unit consisting of laminated silts to fine-grained ripple cross laminated sands containing bands of iron-rich silty clay and silty sand (red/orange = oxidized).	
G	0.40 m	St, Gt	SW	Coarsening upwards unit consisting of fine- to medium-grained, trough cross-bedded sands passing upwards into coarse-grained, trough cross-bedded sands and gravels (sets up to 50 cm thick). Clay rip-up clasts common. Gravel horizon at top of zone contains subrounded clasts <12 cm in diameter.	

directions were derived from the orientation of foresets of rippled and trough cross-bedded facies. Individual facies types were grouped into stratigraphic zones according to their vertical associations and similarity of genetic origin (Figure 6).

This sedimentological approach has been used to record successfully and reconstruct the history of other valley infills in the Himalayas and Canadian Cordillera, and has allowed a better understanding of glacial sedimentology in those regions (Cenderelli and Wohl, 1998; Kershaw, Clague and Evans, 2005). By determining the nature of the sediment infill within the valley, estimations can be made regarding substrate permeability and the potential connectivity of surface- groundwater systems (Fountain and Walder, 1998). Ultimately, the findings of this study will allow enhanced understanding of the depositional history and hydrogeological significance of valley infill sedimentary successions formed in rapidly deglaciated regions.

Sediments of Paleolake Jircacocha (PLJ)

Facies Descriptions

The outcrop of PLJ sediments is dominated by medium to coarse-grained sands and gravels and consists of a series of coarsening-upward successions with intervening units of deformed, fine-grained sediment. *Fine-grained facies* consist of laminated silty-clay sediments with common soft sediment deformation features (F1, Fd) that contain secondary massive and/or laminated silty-clay inclusions (Table 1, Figure 6). *Sand facies* include massive fine to medium grained sands with no structure (Sm), sands with common soft sediment deformation structures

(Sd), trough cross-bedded facies (St), rippled sands (Sr), and horizontally laminated sands (Sh; Table 1, Figure 6). *Gravel facies* consist of massive (structureless) to crudely bedded units (Gms), massive units (Gm), and trough cross-bedded facies (Gt; Table 1, Figure 6). These facies types were grouped into seven distinct stratigraphic zones (Zones A – G) that may be used to reconstruct temporal changes in depositional and paleoenvironmental conditions.

Starting at the base of the section, *Zone G* forms a coarsening upwards succession comprising fine to medium grained cross-bedded sands and sub-rounded gravels containing clay rip-up clasts (St, Gt; Table 1, Figure 6). These cross-bedded facies are interpreted to record deposition of relatively coarse-grained sediment on sinuous crested dunes migrating along the channel of a fluvial system (Miall, 1978; Miall, 1985). *Zone G* contains the thickest set of trough cross-beds recorded in the outcrop and the presence of rip-up clasts indicates that these sediments were deposited by relatively high velocity and erosive flows (Benito, Sánchez-Moya and Sopena, 2003).

Zone F is a highly variable unit that coarsens upwards from laminated fines at the base, through rippled sands with thin silty clay beds, into trough cross-bedded coarse-grained sands and massive gravels at the top (F1, Sr, St, Gm; Table 1, Figure 6). The presence of fine-grained laminated deposits at the base of this zone indicates deposition in low energy (lacustrine) conditions, which transition into higher energy fluvial conditions up-section. This change in depositional energy may relate to changes in water depth in the PLJ basin (high to low), or to variable amounts of sediment input (low to high).

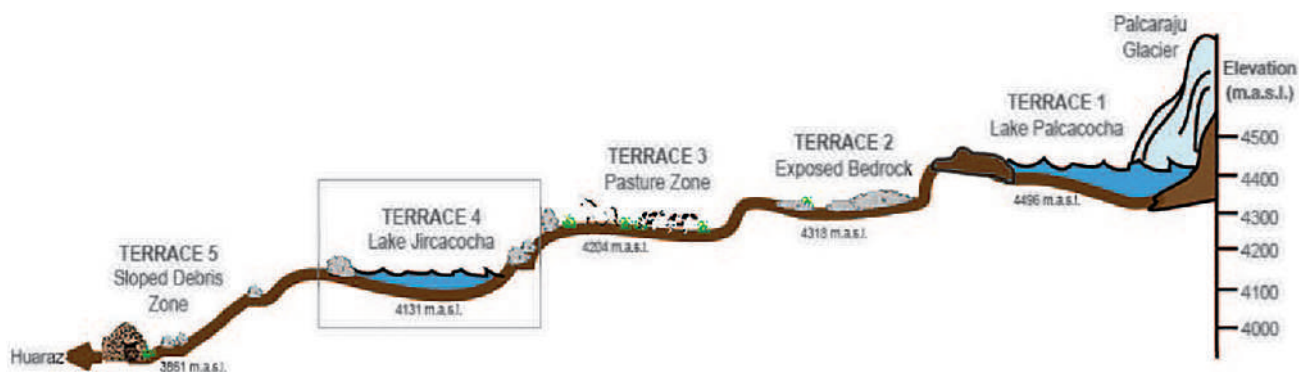


Figure 4. Schematic diagram showing a series of postulated terraces within the Cojup Valley (increasing elevation to the right; length of valley approximately 14 km) with Paleolake Jircacocha infilling the dammed basin on one of the terraces (number and elevation of terraces approximate).

Zone E forms a similar coarsening upward sequence passing from fine-grained laminated silts and clays into trough cross-bedded coarse-grained sands and gravels with rip-up clasts (F1, St/Gt; Table 1, Figure 6) and is also interpreted to record a change from low to high depositional energy. The coarse-grained deposits at the top of *Zone E* are abruptly overlain by fine-grained sediments at the base of *Zone D* which contain distinctive soft sediment deformation structures (Fd; Table 1, Figure 6) probably caused by dewatering due to the rapid deposition of fine- over coarse-grained sediment (Cheel and Rust, 1986). The fine sediments in this zone have rich red/orange colors indicative of staining by oxidized iron compounds. *Zone D* also shows a coarsening upwards trend with coarse-grained cross-bedded sands at the top of the unit. It is important to note that compared to *Zones G, F, and E*, the trough cross-bed sets in *Zone D* are noticeably smaller (Figure 6). These cross-bedded units are interpreted to have formed by the downstream migration of bed forms such as ripples and dunes under unidirectional traction currents, which appear to be diminishing in strength up-section.

Zone C is subdivided into three units that share a common abundance of deformed fine-grained sediment but differ in the proportion of coarser-

gained materials they contain (Table 1, Figure 6). *Zone 3C* consists of horizontally laminated and massive coarse-grained sand interbedded with crudely-stratified gravel, and massive/deformed clays (Sh, Sm, Gms, Fm, Fd; Table 1, Figure 6). Included in this zone are thin units of rippled fine sand with coarse sand pockets and small pebble inclusions 10-12 mm in diameter. This zone also shows abundant evidence of soft-sediment deformation (interpreted as water escape structures) in horizons where silts and clays immediately cap coarse sands. *Zone C2* is coarser grained and consists of interbedded coarse-grained massive and rippled sands and gravels with clasts 5-15 mm in diameter, and thin deformed sand and silt layers (Gm, Sm, Sr, Sd, Fd; Table 1, Figure 6). *Zone C1* consists predominantly of fine laminated silts and clays that contain sand pockets and abundant soft sediment deformation structures and interbedded massive and rippled sands (F1, Fd, Sm, Sr; Table 1, Figure 6).

Zone B consists of a single, very distinctive horizon of massive to crudely-bedded gravel with a coarse sand matrix (Gms; Table 1, Figure 6). Clast size is highly variable (1-9.5 cm) and the unit contains some larger boulders (up to 10 cm in diameter). This zone contains the coarsest material recorded in the outcrop.



Figure 5. Eight-meter-high outcrop of Paleolake Jircacocha sediments in the Cojup Valley. Photo: C. Andres.

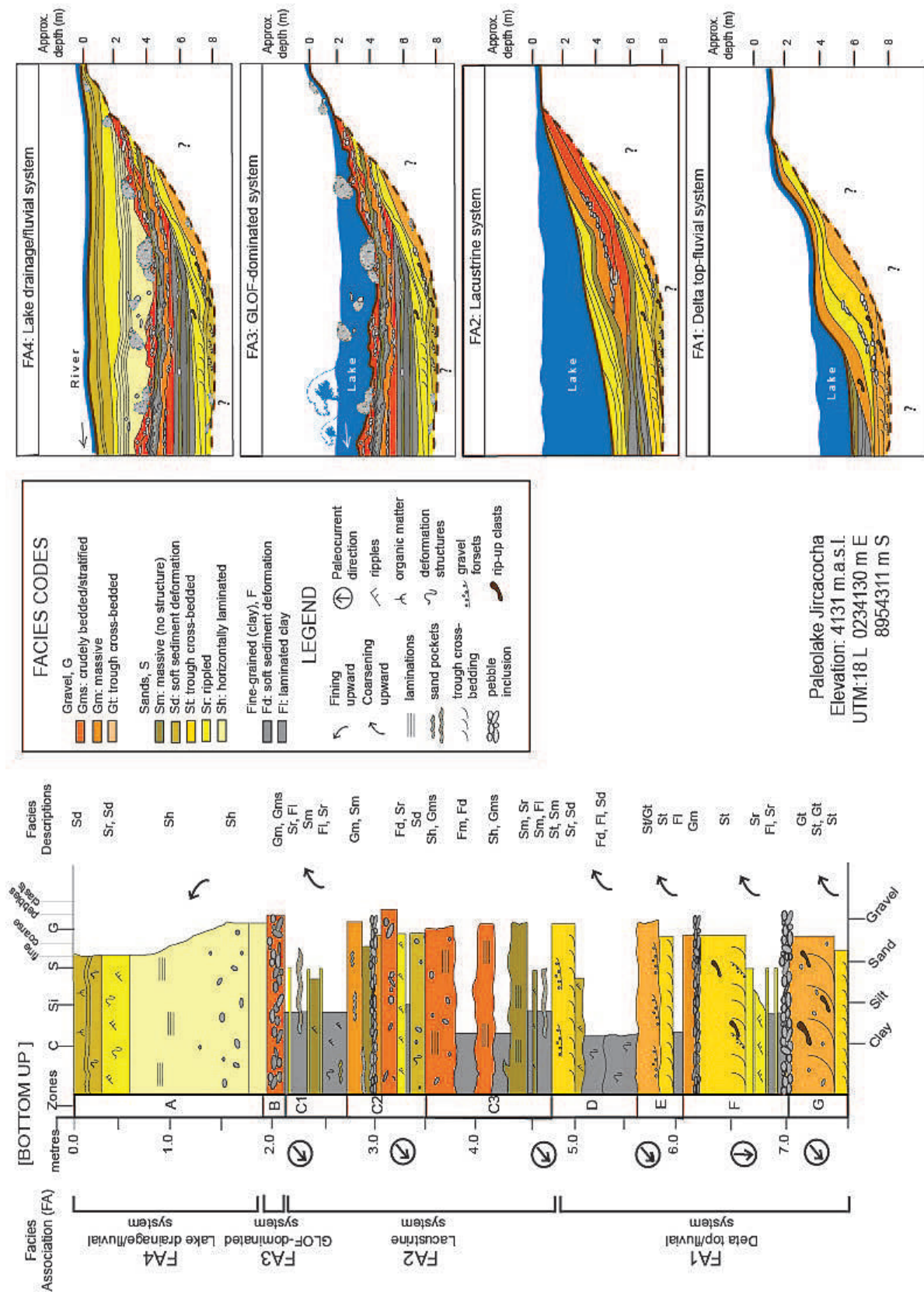


Figure 6. Sedimentological log of the eight-meter-high exposure through Paleolake Jircacocho sediments. Sedimentary facies types are grouped into zones (A-G) and associations (FA1-FA4) to aid in paleoenvironmental reconstruction. The facies codes and symbols are shown in the legend. On the right are schematic reconstructions of environmental conditions in which sediments of FA1 – 4 were deposited. No data are available regarding the nature of sediments beneath those exposed in outcrop.

Zone A is the uppermost sedimentary unit exposed in the outcrop and shows a fining upward sequence of horizontally laminated and rippled/deformed sands with scattered clasts and common organic matter (Sh, Sd, Sr; Table 1, Figure 6). This sediment package shows a low degree of textural heterogeneity and is the thickest single unit recorded in the outcrop (1.75 m, Figure 6).

Facies Associations (FAs) and Interpretation

To determine the overall depositional setting and paleoenvironmental change recorded by sediments exposed in the outcrop, spatially and genetically related sediment zones are organized into facies associations (FAs). This study defines FAs as a group of sedimentary facies that are linked in terms of their genesis and can be used to define particular depositional conditions. FAs can represent changes in depositional conditions as a function of changing forces within a single depositional environment and may reflect changes on variable time scales. For example, an FA can record an increase or decrease in sediment supply, advance or retreat of the ice margin, rise or fall of base level, or a combination of these forces within the environment (Boulton, 1990).

In this study, four FAs can be discriminated in the outcrop exposures and record significant fluctuations in depositional conditions. The FAs represent the initial delta top/fluvial system (FA1), a lacustrine system (FA2), GLOF-dominated system (FA3), and a lake drainage/fluvial system (FA4).

FA1: Delta Top/Fluvial System

FA1 consists of four coarsening upwards successions (Zones G, F, E, and D; Table 1, Figure 6) and is dominated by relatively coarse-grained, trough cross-bedded sands that were probably deposited by unidirectional traction currents in a fluvial setting. Intervening massive and laminated fine-grained sediments record low energy conditions and are interpreted as lacustrine deposits. The coarsening upwards successions characteristic of FA1 are therefore interpreted to represent deposition during episodes of increasing flow velocity and/or sediment supply and may represent successive periods of delta growth as sediment enters into a developing lake. This sediment was supplied by stream systems crossing the valley floor and its delivery may have been punctuated by seasonal variations in precipitation and meltwater

supply. Fine-grained sediments at the base of the coarsening upward successions record quiet water lacustrine conditions when incoming fluvial flows were minimal (e.g. at the beginning of the austral spring; Mark and Seltzer, 2003). Higher meltwater discharges associated with the wet-dry transition period (March-April) may be recorded by coarse-grained, cross-bedded facies. The coarsening upward successions of FA1 may also reflect changes in basin accommodation space as the lake begins to fill. The coarsening upward successions get thinner as the basin infills with sediment transported by the fluvial system, resulting in less available accommodation space. This portion of the lake basin probably acted as an effective sediment trap as the lake developed.

FA2: Lacustrine System

FA2, comprising Zones C1, C2, and C3 (Figure 6), contains a wide variety of facies types, ranging from gravels and coarse sands (Gms, Sh, St, Sm; Table 1, Figure 6) to massive and laminated silts and clays (Fm, Fl; Table 1, Figure 6). The prevalence of fine-grained silts and clays in this association indicates deposition primarily in a low energy environment, probably a non-ice contact glacial lake (Einsele, 2000). The presence of coarser grained, rippled, trough cross-bedded and massive sands and gravels suggests that low energy conditions were periodically interrupted by higher velocity flows. These higher velocity flows may be related to seasonal changes in fluvial inputs to the lake (see above), seasonal flood events, or may represent periods in which sediment infilling reduced water depths in the lake and allowed fluvial conditions to prevail. The stacking of repeated coarsening upward successions in FA2 may record the progressive increase of water levels in the lake, with seasonal variations in water and sediment flux producing alternating coarse and fine-grained sediment packages (Figure 6).

FA3: GLOF-dominated System

FA3 is a single facies zone (Zone B; Figure 6) comprised of massive gravels capped by, and occasionally underlain by, crudely stratified gravels (Gm, Gms; Table 1, Figure 6). These components are interpreted as the deposition of hyperconcentrated, high-velocity flows associated with the main flood surge of the GLOF that occurred in 1941. This interpretation is made on the basis of the coarse-grained nature of the deposit and its stratigraphic

position close to the top of the outcrop. Large boulders (up to 2 m diameter; Figure 7) found on the nearby ground surface were also deposited during this event. The 1941 GLOF caused a breach of the sediment dam impounding Paleolake Jircacocha, and overlying deposits of FA4 record drainage of the lake.

FA4: Lake Drainage and Fluvial System

Rapid drainage of Paleolake Jircacocha following the 1941 GLOF is recorded by the fining upwards succession of FA4 (Zone A; Table 1, Figure 6). FA4 was deposited by fluvial flows of diminishing velocity as the GLOF waned and deposited a thick unit of horizontally-bedded, coarse- to fine-grained sands containing scattered clasts at the base (lower section of Zone A; Figure 6). This fining upwards succession is interpreted to represent a series of sand-rich fluvial deposits formed under conditions of decreasing flow velocity following the flood event that formed Zone B. These sands pass upwards into fine-grained, rippled and deformed sand facies deposited as the paleolake drained and lake floor sediments were finally exposed. At this time, it is assumed that drainage along the valley was focused into a single channel and became incised into the former lake floor sediments, creating

the current outcrop exposure. Today, the majority of the area is vegetated, with scattered large boulders on the ground surface at the top of the outcrop (Figure 7) considered to be remnants of the 1941 flood event and equivalent to FA3 deposits exposed in the outcrop. The modern valley landsystem is strongly influenced by mass movements from the valley sides, including catastrophic rockslope failures (RSFs; c.f. Evans and Clague, 1994). These failures were probably responsible for the debris dam that blocked drainage of the Cojup Valley and allowed the formation of Paleolake Jircacocha. Rockslope failures also have the potential to create similar lakes in other valleys draining the CB in the future.

Valley Infilling in the Cordillera Blanca

Paleoenvironmental Reconstruction

Detailed sedimentological analysis of the exposed sediments of Paleolake Jircacocha allows subdivision of the succession into facies zones and associations that can be used as a basis for paleoenvironmental reconstruction. The FAs delineated in this study are interpreted to record deposition in a meltwater-fed, delta top/fluvial system (FA1) that transitions into a



Figure 7. Large boulders (up to 2 m in diameter) on the ground surface immediately up-valley from the Paleolake Jircacocha outcrop in the Cojup Valley. The boulders may have been transported and deposited by the GLOF of 1941. Photo: C. Andres.

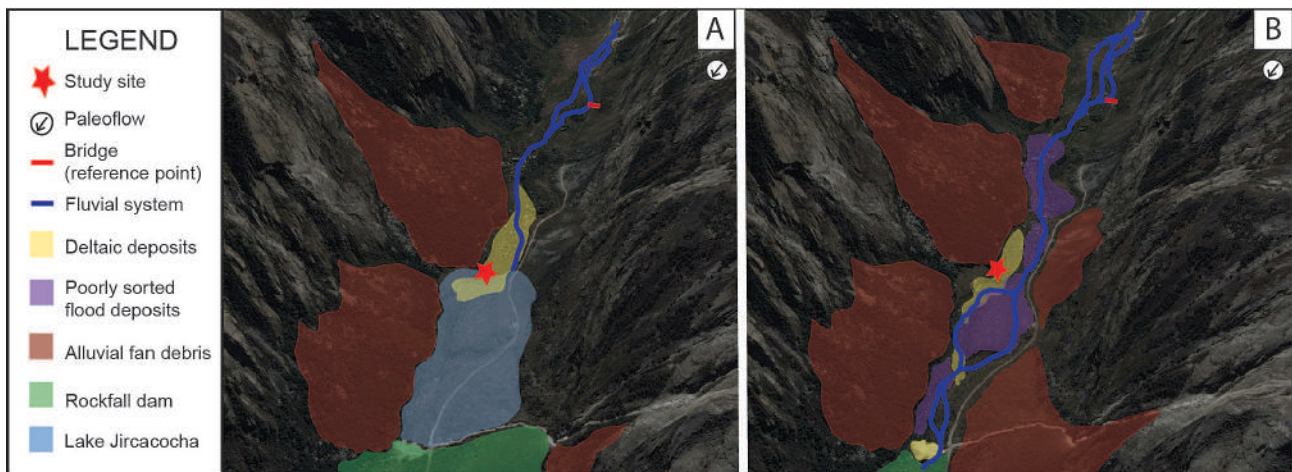


Figure 8. Schematic paleogeographic reconstruction of the former Paleolake Jircacocha in the Cojup Valley (Cordillera Blanca, Peru). (A) Shows the valley pre-GLOF when the lake existed and (B) the present day. Many different fluvial and slope related processes influence sediment transport and deposition in the modern environment.

lacustrine environment (FA2). These environments were dramatically impacted by the 1941 GLOF which resulted in the deposition of a coarse-grained gravel horizon (FA3) and drainage of the lake (FA4; Figure 6). Figure 8 presents a paleogeographic reconstruction of PLJ and the mid-valley region of the Cojup Valley before (Figure 8A) and after (Figure 8B) the 1941 GLOF incident.

Although the debris that dammed PLJ may have been delivered by rockfalls (Tacconi Stefanelli et al., 2018), there is a possibility that some of the debris may be of glacial origin (Vilímek et al., 2005). It is extremely difficult to discriminate former morainic material from rockfall and debris cones given that slope activity continues to the present day and may obscure older landforms. It is also difficult to establish the age of the initial rockfall dam and the timing of lake formation as no radiometric dating of organic material has been conducted to date and subsequent slope activity makes lichenometric and cosmogenic isotope dating of surface boulders unreliable (Rodbell, Smith and Mark, 2009). Given the position of PLJ in the Cojup Valley, the initial debris dam could have developed at any time after retreat of ice from this portion of the valley during the Holocene.

Depositional Setting

Valley glaciers produce distinctive assemblages of sediments and landforms (the glaciated-valley landsystem; Boulton and Eyles, 1979; Spedding and Evans, 2002). The glaciated valley landsystem may contain ice-marginal, supraglacial, subglacial, proglacial, and subaquatic landform-sediment assemblages in close proximity or superimposed on

one another, recording the existence and transition of very different depositional environments (Boulton and Eyles, 1979). Glaciated valley landsystems are distinctive due to the importance of the valley sides as debris and sediment sources and the topographic confinement of their depositional basins (Benn and Evans, 2010).

The Cojup Valley in which PLJ was situated shares similarities with several analogous linear valleys in the Cordillera Blanca that were subject to similar infilling processes during deglaciation, probably in the early or later Holocene. Preliminary investigation of exposures of valley infill sediments in the Rajucolta and Parón valleys in the CB shows similar accumulations of fluvial, deltaic and lacustrine facies along the deglaciated valley floors. Other dammed valleys with similar arrangement of debris-dammed lakes relative to PLJ are found in the Llanganuco and Santa Cruz valleys (Emmer and Juricova, 2017).

At present, there is no single model for deglaciated valley infilling processes, since there are many factors that affect sedimentation in such environments, including slope activity, lake damming and draining, changes in stream discharge and sediment supply, and GLOFs or mass wasting events. As most glacial valleys display irregular, scalloped and terraced floor topography, with increasing elevation towards the ice front, the distal and proximal glacial valley infill characteristics may look quite different. Paleolake Jircacocha lies mid-way along the length of the Cojup Valley and the sediment characteristics recorded from the outcrop described here can be considered to represent the mid-valley portion of a deglaciated valley system. The spatial relationships of the

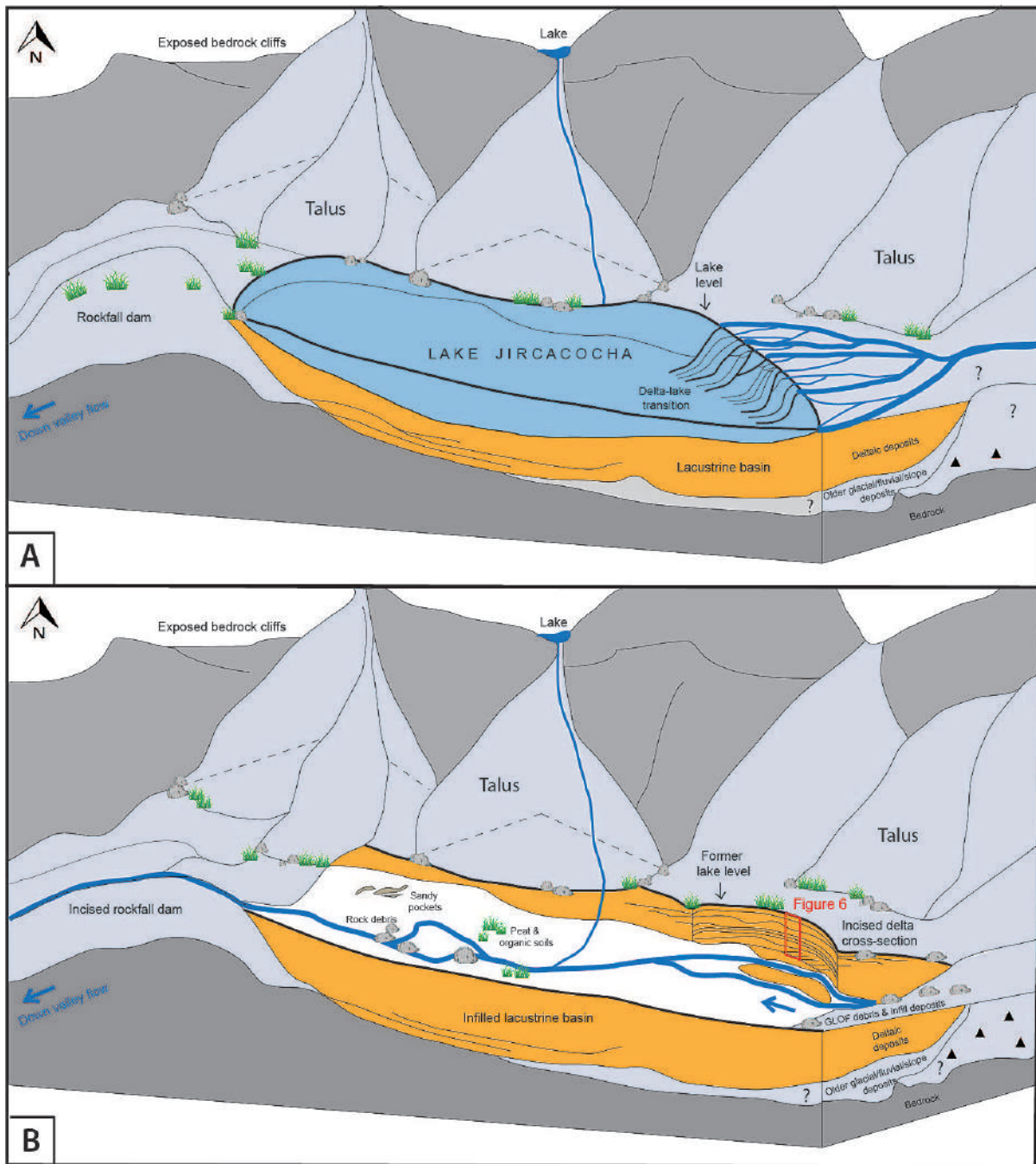


Figure 9. Schematic diagram to illustrate mid-valley infilling sediments characteristic of a GLOF- and slope-dominated landsystem. (A) The early stages of sedimentation in a ponded lake such as PLJ, showing the depositional environments of FA1: delta top/fluvial system and FA2: lacustrine system. (B) Modern state of PLJ showing the characteristic distribution of sediment facies and substrate types. FA3: GLOF-dominated system and FA4: lake drainage/fluvial system.

sedimentary environments that characterize the mid-valley portion of the deglaciated Cojup Valley (before and after drainage of PLJ) are shown schematically in Figure 9.

It is important to note the significance of fluvial, lacustrine, talus and slope processes that have influenced sedimentation within the deglaciated Cojup Valley system. Although the 1941 GLOF dramatically reorganized the valley's drainage and

sediment transport pathways in recent times, the collapse of exposed rock walls into the valley and onto receding glaciers has contributed large volumes of debris into the system in the past. Where rock slope failures (RSFs) have occurred and have broken up during downslope transport, they are commonly represented by extensive boulder fields lying along the valley floor and at the base of bedrock cliffs. Their volume and surface appearance has led to the misidentification of many RSFs as potential rock

glaciers and even glacial moraines (Ballantyne and Stone, 2004). As noted above, the discrimination of rockfall debris from moraines is extremely important as cosmogenic radionuclide dating of boulders found on moraines is commonly used to establish the timing of glacial advance and retreat in the valleys of the CB (e.g. Farber et al., 2005; Bromley et al., 2009; Stansell et al., 2017).

In the schematic diagram representing the PLJ region presented in Figure 9, a significant amount of rockfall debris and debris flow deposits are shown to contribute to the valley infill along the valley margins as talus and slope deposits. These deposits were not observed in the exposures described above from mid-portions of the valley, but can be seen elsewhere closer to the valley walls. Internally, these talus deposits consist of openwork-gravels or diamictons and commonly exhibit crude slope-parallel bedding.

Although no primary glacial deposits were observed within the sedimentary exposures examined in the mid-portion of the Cojup Valley, they may underlie the fluvial/lacustrine deposits described here, recording the former period of glacial occupancy. However, it is also likely that any primary glacial deposits formed in the valley have been reworked by subsequent paraglacial, slope and fluvial processes (Harrison, Whalley and Anderson, 2008).

Conclusions and Implications

This research presents a detailed analysis of the sedimentary characteristics of fluvial and lacustrine infill deposits of Paleolake Jircacocha exposed in an outcrop within the Cojup Valley of the Cordillera Blanca, Peru. Identification and analysis of sediment characteristics can be utilized to better understand the record of paleoenvironmental change and recurrence of past mass wasting events and floods (e.g., GLOFs) in these shallow basins. The delineation of seven sedimentological facies zones, dominated by sands, gravels and fine-grained facies enabled identification of four facies associations which have been used to reconstruct paleoenvironmental conditions that transitioned from delta top/fluvial to lacustrine and returned to fluvial as the lake finally drained after the 1941 GLOF. Enhanced understanding of processes involved in the infilling of valley floors at

some time after deglaciation allows prediction of the scale, geometry, and cyclical variability of sediments comprising the infills of other deglaciated basins, particularly in highly unstable glaciated regions that are prone to GLOFs.

The characterization of sediment heterogeneity in the deposits that infill the Cojup valley, as well as other valleys in the CB, can be used to better understand the spatial extent, connectivity, and stratigraphic relationships of potential surface and groundwater resources (Figure 9). The sedimentological information presented here can be combined with other data (e.g., hydrological, geophysical, and remotely sensed landform data) to construct more robust and dynamic conceptual frameworks that may be used to predict and monitor surface and ground water transport and storage in similar deglaciated valleys in other regions of the Andes and elsewhere. With the expected decrease in glacial meltwater output from the Cordillera Blanca as glaciers continue to recede (Baraër et al., 2012) there is a critical need to evaluate the sustainability of water resources in the region (Gordon et al., 2015; Somers et al., 2016). This preliminary study is intended to demonstrate the ability of sedimentological and landsystem analyses of valley infill deposits (e.g. Slomka and Eyles 2013; Lee, Maclachlan and Eyles, 2018; Malecki et al., 2018) to enhance understanding of complex depositional histories and the dynamic glacial and non-glacial processes that continue to operate in these environments.

Acknowledgements

We are extremely grateful to Dr. Benjamín Morales, Executive President (until July 22, 2018) of the Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) in Huaraz, for inviting us to conduct this research. This work would not have been possible without the logistical support of the many engineers and personnel at INAIGEM. Fieldwork assistance was also provided by Luzmila Dávila Roller, Óscar Vilca, and David Bowman. Rebecca Lee is thanked for her assistance with manuscript preparation. This work was funded by an NSERC USRA grant to Andres, an NSERC PGS (D) to Narro-Pérez and an IIMF grant from McMaster University.

References

- Alley, R. B., Mayewski, P. A., Sowers, T., Stuiver, M., Taylor, K. C. and Clark, P. U. (1997). Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*, 25(6), 483-486.
- Ames Márquez, A. and Francou, B. (1995). Cordillera Blanca glacières en la Historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(1), 37-64.
- Ballantyne, C. K. and Stone, J. O. (2004). The Beinn Alligin rock avalanche, NW Scotland: Cosmogenic ¹⁰Be dating, interpretation and significance. *The Holocene*, 14(3), 448-453.
- Barač, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M. Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I.,... Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150.
- Benn, D. I. and Evans, D. J. A. (1996). The interpretation and classification of subglacially-deformed materials. *Quaternary Science Reviews*, 15(1), 23-52.
- Benn, D. I. and Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and glaciation* (2nd ed.). London, Hodder Education.
- Benito, G., Sánchez-Moya, Y. and Sopena, A. (2003). Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River, Central Spain. *Sedimentary Geology*, 157(1-2), 107-132.
- Boulton, G. S. (1990). Sedimentary and sea level changes during glacial cycles and their control on glacial facies architecture. In Dowdeswell, J. A. and Scourse, J. D. (Eds.). *Glacial marine Environments: Processes and Sediments*. Special Publication 53, 15-52. London, Geological Society.
- Boulton, G. S. and Eyles, N. (1979). Sedimentation in valley glaciers: a model and genetic classification. In Schlichter, C. (Ed.). *Moraines and varves; Origin, genesis, classification*, 11-24. Proceedings of an INQUA symposium on genesis and lithology of Quaternary deposits, Zürich, 10-20 September 1978. Rotterdam, A. A. Balkema Publishers.
- Bromley, G. R. M., Schaefer, J. M., Winckler, G., Hall, B. L., Todd, C. E. and Rademaker, K. M. (2009). Relative timing of last glacial maximum and late-glacial events in the central tropical Andes. *Quaternary Science Reviews*, 28(23-24), 2514-2526.
- Byers, A. C. (1999). *Cambios en el paisaje contemporáneo del Parque Nacional Huascarán y su zona de amortiguamiento, Cordillera Blanca, Perú*. Programa Andino, Serie Documentos de Trabajo, 99.1. Huaraz, Instituto de Montaña.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. New York, Oxford University Press.
- Cenderelli, D. A. and Wohl, E. E. (1998). Sedimentology and clast orientation of deposits produced by glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. In Kalvoda, J. and Rosenfeld, C. L. (Eds.). *Geomorphological hazards in high mountain areas*, 1-26. The GeoJournal Library, 46. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Cheel, R. J. and Rust, B. R. (1986). A sequence of soft-sediment deformation (dewatering) structures in Late Quaternary subaqueous outwash near Ottawa, Canada. *Sedimentary Geology*, 47(1-2), 77-93.
- Cook, S. J. and Swift, D. A. (2012). Subglacial basins: Their origin and importance in glacial systems and landscapes. *Earth-Science Reviews*, 115(4), 332-372.
- Cross, T. A. and Homewood, P. W. (1997). Amanz Gressly's role in founding modern stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 109(12), 1617-1630.
- Einsele, G. (2000). *Sedimentary basins: Evolution, facies, and sediment budget* (2nd ed.). Berlin and Heidelberg, Springer-Verlag.
- Emmer, A. and Juřicová, A. (2017). Inventory and typology of landslide-dammed lakes of the Cordillera Blanca (Peru). In Mikoš, M., Vilímek, V., Yin, Y. and Sassa, K. (Eds.). *Advancing culture of living with landslides, Vol. 5: Landslides in different environments*, 259-266. 4th World Landslide Forum, Ljubljana, Slovenia. Cham, Switzerland, Springer.
- Evans, S. G. and Clague, J. J. (1994). Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology*, 10(1-4), 107-128.
- Eyles, N., Eyles, C. H. and Miall, A. D. (1983). Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial

- diamict and diamictite sequences. *Sedimentology*, 30(3), 393-410.
- Farber, D. L., Hancock, G. S., Finkel, R. C. and Rodbell, D. T. (2005). The age and extent of tropical alpine glaciation in the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Quaternary Science*, 20(7-8), 759-776.
- Fountain, A. G. and Walder, J. S. (1998). Water flow through temperate glaciers. *Reviews of Geophysics*, 36(3), 299-328.
- Gordon, R. P., Lautz, L. K., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Chavez, D. and Barač, M. (2015). Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 522, 628-644.
- Hambrey, M. J. and Ehrmann, W. (2004). Modification of sediment characteristics during glacial transport in high-alpine catchments: Mount Cook area, New Zealand. *Boreas*, 33(4), 300-318.
- Harrison, S., Whalley, B. and Anderson, E. (2008). Relict rock glaciers and protalus lobes in the British Isles: Implications for Late Pleistocene mountain geomorphology and palaeoclimate. *Journal of Quaternary Science*, 23(3), 287-304.
- Kaser, G., Ames, A. and Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136-140.
- Kershaw, J. A., Clague, J. J. and Evans, S. G. (2005). Geomorphic and sedimentological signature of a two-phase outburst flood from moraine-dammed Queen Bess Lake, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(1), 1-25.
- Lee, R. E., Maclachlan, J. C. and Eyles, C. H. (2018). Landsystems of Morsárjökull, Skaptafellsjökull and Svínafellsjökull, outlet glaciers of Vatnajökull Ice Cap, Iceland. *Boreas*, 47(4), 1199-1217.
- Malecki, J., Lovell, H., Ewertowski, W., Górski, L., Kurczaba, T., Latos, B.,... Rabatel, A. (2018). The glacial landystem of a tropical glacier: Charquini Sur, Bolivian Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(4), 1199-1217.
- Margirier, A., Braun, J., Robert, X., and Audin, L. (2018). Role of erosion and isostasy in the Cordillera Blanca uplift: Insight from landscape evolution modeling (northern Peru, Andes). *Tectonophysics*, 728-729, 119-129.
- Mark, B. G. and Seltzer, G. O. (2003). Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: A case study in the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Glaciology*, 49(165), 271-281.
- Miall, A. D. (1978). Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: A summary. In Miall, A. D. (Ed.). *Fluvial Sedimentology*, 597-604. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5.
- Miall, A. D. (1985). Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22(4), 261-308.
- NSIDC (National Snow & Ice Data Center). (2017). Retrieved from <https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/questions/climate.html> [accessed 20 Feb. 2018].
- Rodbell, D. T., Smith, J. A. and Mark, B. G. (2009). Glaciation in the Andes during the Lateglacial and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 28(21-22), 2165-2212.
- Schellart, W. P. (2008). Overriding plate shortening and extension above subduction zones: A parametric study to explain formation of the Andes Mountains. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11-12), 1441-1454.
- Slomka, J. M. and Eyles, C. H. (2013). Characterizing heterogeneity in a glaciofluvial deposit using architectural elements, Limehouse, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50, 911-929.
- Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B. and Pouyaud, B. (2007). Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: "Little Ice Age" moraine chronology. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 225-235.
- Somers, L. D., Gordon, R. P., McKenzie, J. M., Lautz, L. K., Wigmore, O., Glose, A.,... Condom, T. (2016). Quantifying groundwater-surface water interactions in a proglacial valley, Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 30(17), 2915-2929.
- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., Rivas, D. S., Portocarrero, C. and McKinney, D. C. (2016). Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2519-2543.

- Spedding, N. and Evans, D. J. A. (2002). Sediments and landforms at Kvíárjökull, southeast Iceland: A reappraisal of the glaciated valley landsystem. *Sedimentary Geology*, 149(1-3), 21-42.
- Stansell, N. D., Licciardi, J. M., Rodbell, D. T. and Mark, B. G. (2017). Tropical ocean-atmospheric forcing of Late Glacial and Holocene glacier fluctuations in the Cordillera Blanca, Peru. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 4176-4185.
- Tacconi Stefanelli, C., Vilímek, V., Emmer, A. and Catani, F. (2018). Morphological analysis and features of the landslide dams in the Cordillera Blanca, Peru. *Landslides*, 15(3), 507-521.
- UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos). (2014). *Inventario de lagunas glaciares del Perú*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua.
- Vaughan, D. G., Comiso, J. C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R.,... Zhang, T. (2013). Observations: Cryosphere. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J.,... Midgley, P. M. (Eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 317-382. Cambridge University Press.
- Vilímek, V., Zapata, M. L., Klimeš, J., Patzelt, Z. and Santillán, N. (2005). Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides*, 2(2), 107-115.
- 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 Cambio Climático." Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Wise, J. M. and Noble, D. C. (2003). Geomorphic evolution of the Cordillera Blanca, northern Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 96, 65-85.

Sedimentology and Structure of the Lake Palcacocha Laterofrontal Moraine Complex in the Cordillera Blanca, Peru

Sedimentología y Estructura del Complejo de la Morrena Laterofrontal de la Laguna Palcacocha en la Cordillera Blanca, Perú

David Bowman¹, Carolyn H. Eyles¹, Rodrigo Narro-Pérez¹ and Roque Vargas²

¹*School of Geography and Earth Sciences, McMaster University, Hamilton, ON, Canada*

²*Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Huaraz, Ancash*

Abstract

The contemporary retreat of tropical glaciers in the Cordillera Blanca mountain range of Peru has resulted in the widespread formation of moraine-dammed glacial lakes. As continued glacial melt causes these lakes to grow in size, they pose the risk of unleashing glacial lake outburst floods (GLOFs), mass-wasting events that involve rapid lake drainage facilitated by a breach in the moraine dam. In 1941, a breach in the moraine dam at Lake Palcacocha produced a GLOF that killed close to 2000 people in the city of Huaraz. Current hazard assessment criteria for GLOF occurrence do not fully reflect the role of internal moraine structure in GLOF mitigation. Field observations of the sedimentology and structure of the Lake Palcacocha moraine have allowed a sequence of events for the genesis and evolution of the moraine to be proposed. The depositional conditions under which the Lake Palcacocha moraine developed gave rise to specific sedimentological structures within the moraine that could play a role in determining its resistance to failure. A thorough understanding of the processes governing moraine formation in the Cordillera Blanca is critical for modelling the development of both past and future moraines. These models can be applied to better understand the formation and stability of moraine dammed glacial lakes.

Keywords: *Glacial sedimentology, glacial geomorphology, Palcacocha moraine, GLOF, Cordillera Blanca, climate change*

Resumen

El retroceso actual de los glaciares tropicales en la Cordillera Blanca del Perú ha dado lugar a la formación generalizada de lagunas glaciares con diques morrénicos. Como la continua fusión de los glaciares hace que estas lagunas crezcan, presentan el riesgo de desencadenar inundaciones (GLOFs, por

sus siglas en inglés), eventos de pérdida de masa que involucran un rápido drenaje de la laguna, facilitado por una brecha el dique morrénico. En 1941, una brecha en la morrena de la laguna Palcacocha produjo un GLOF que mató a cerca de 2000 personas en la ciudad de Huaraz. Los criterios actuales de evaluación de peligros para la ocurrencia de GLOFs no reflejan completamente la estructura interna de la morrena en la mitigación de un GLOF. Las observaciones de la sedimentología y la estructura de la morrena de la laguna Palcacocha han permitido proponer una secuencia de eventos para la génesis y evolución de la morrena. Las condiciones de deposición bajo las cuales se desarrolló la morrena de Palcacocha dieron lugar a estructuras sedimentológicas específicas dentro de la morrena que podrían desempeñar un papel en la determinación de su resistencia a fallar. Un mejor entendimiento de los procesos que gobiernan la formación de morrenas en la Cordillera Blanca es fundamental para modelar el desarrollo de las morrenas pasadas y futuras. Se pueden aplicar estos modelos para comprender mejor la formación y estabilidad de las lagunas glaciares represadas por morrenas.

Palabras clave: *Sedimentología glacial, geomorfología glacial, morrena de Palcacocha, GLOF, Cordillera Blanca, cambio climático*

Introduction

The Cordillera Blanca mountain range, situated in the Peruvian Andes, is home to the world's greatest concentration of tropical glaciers (Figure 1; Mark et al., 2010). Tropical glaciers, glacial bodies that form within the latitudes of $\pm 23.5^\circ$, are particularly sensitive to climatic pressures, and thus exhibit relatively rapid responses to shifts in temperature and humidity (Rodbell, Smith and Mark, 2009). Their occurrence depends on their altitude of formation: the extreme uplift of the Andes during the last 5.4 million years elevated the mountain peaks upwards of 6000

m (Margirier et al., 2017), enabling the formation and growth of glaciers despite the warmer tropical climates at lower altitudes (Clapperton, 1972). However, increases in humidity and temperature since the early 18th century have caused these glaciers to retreat (Rabatel et al., 2013). Glacial retreat is typically accompanied by the deposition of debris from a variety of sources, including avalanche/rockfall inputs and basal freezing. If retreat is accompanied by the release of a significant volume of glacial debris, followed by a stillstand or forward push by the glacier, a moraine may form. Assuming the moraine is sturdy enough, glacial meltwater can pond behind it to produce a moraine-dammed lake.

As glaciers continue to melt in the Cordillera Blanca the number of moraine-dammed lakes has increased to 311 (Emmer et al., 2016). This increase, combined with the potential instability of the morainic dams, creates an opportunity for the occurrence of glacial lake outburst floods (GLOFs). GLOFs are events in which the volume of a glacially-fed lake rapidly drains, often following a breach of its impounding dam. Dam breaches are typically the result of long-term predisposing factors and an acute trigger event, resulting in rapid erosion of the dam and subsequent outflow of the lake (Reynolds, 1992). Due to their incorporation of water, ice, and downstream debris, the ensuing floods can quickly evolve into debris flows, demonstrating massive peak discharge velocities with high damage capacity

(McKillop and Clague, 2007). The Cordillera Blanca has experienced a number of GLOFs in its recent history, and these catastrophic events have also affected many other glacierized mountain ranges, including the Himalayas (Richardson and Reynolds, 2000), the Rocky Mountains (Neal, 2007), and the Swiss Alps (Horstmann, 2004).

One of the earliest GLOFs in the Cordillera Blanca during the 20th century took place on December 13, 1941, when the moraine dam at Lake Palcacocha, located at the end of the Cojup Valley near the city of Huaraz (Figure 2A) was breached (Vilímek et al., 2005). The breach is thought to have been the result of an ice avalanche from the Palcaraju glacier overhanging the lake, which generated an impact wave that overtopped and rapidly eroded the moraine dam. The ensuing flood, with an estimated initial volume between 9 and 11 million m³, entrained the volume of another lake down-valley (Lake Jircacocha), adding nearly 5 million m³ of water (Vilímek et al., 2005). The outburst flood destroyed approximately 1 million m² of the city of Huaraz (Figure 2B) and claimed nearly 2000 lives (Wegner, 2014). Since that time, various other GLOFs have occurred in the Cordillera Blanca, killing hundreds (Lliboutry et al., 1977). With unprecedented glacial melt rates continuing into the 21st century, there is a considerable risk posed to infrastructure and human life by the increased frequency and severity of GLOFs (Somos-Valenzuela et al., 2013).

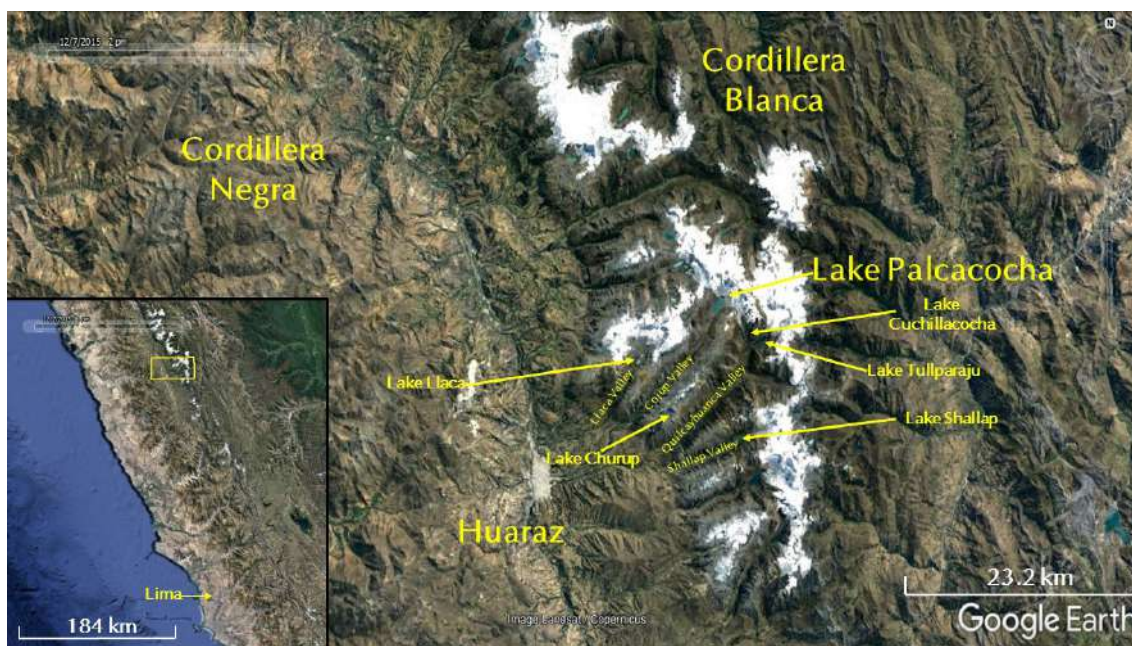


Figure 1. Location map showing the Cojup Valley draining the western slopes of the Cordillera Blanca, near the city of Huaraz. Inset map at lower left shows location of study area, outlined in yellow, and Lima, the capital of Peru. Image source: Google Earth, 2018.

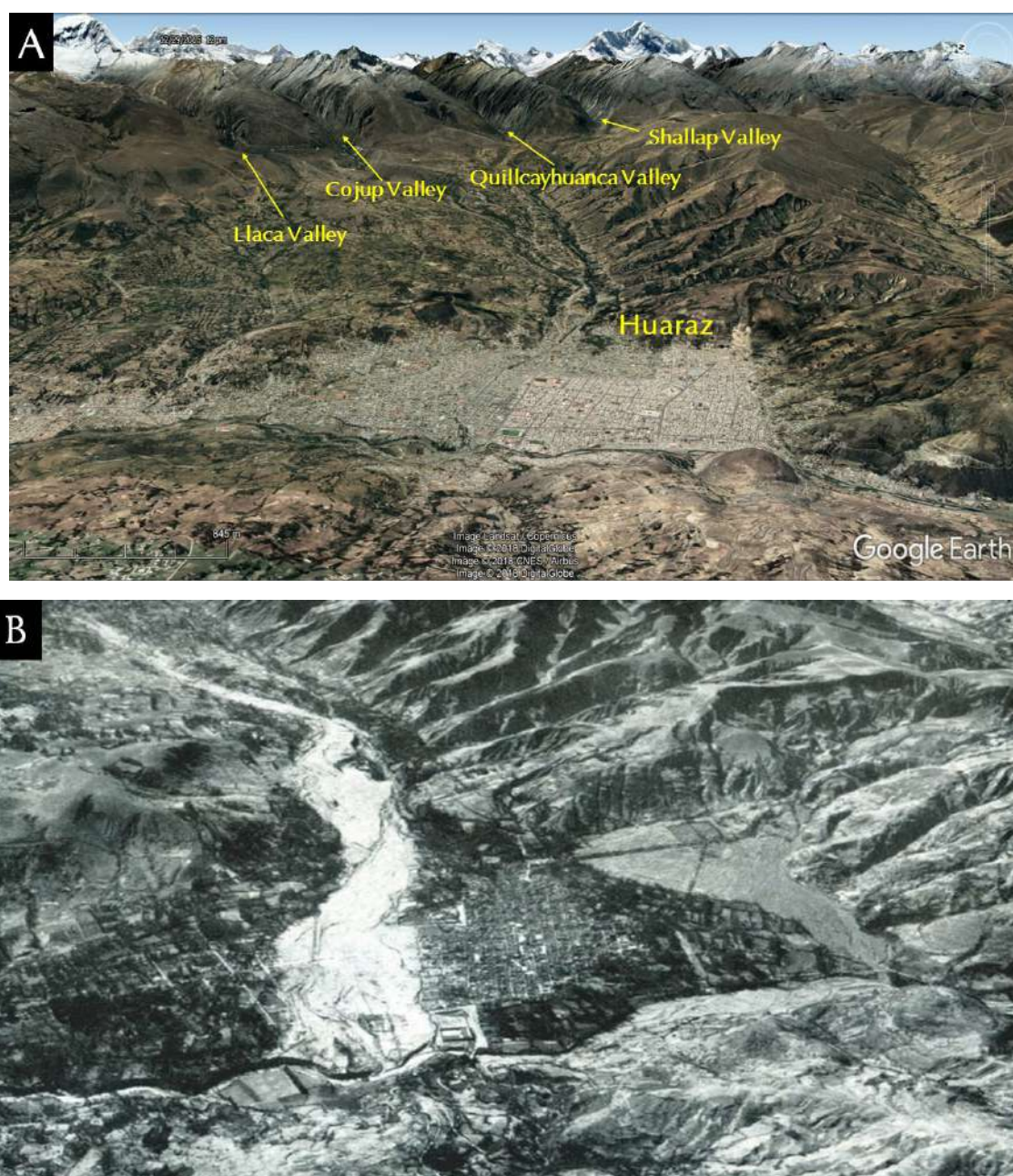


Figure 2. (A) The city of Huaraz at the confluence of the Llaca, Cojup, Quillcayhuanca and Shallap valleys, all of which have glacial lakes at their heads. Image source: Google Earth, 2018. (B) Aerial view of Huaraz (24 June 1947) showing the path cut by the GLOF in 1941. Photo: A. Heim, 1948, fig. 133.

A number of studies have been conducted to determine factors that influence the likelihood of future GLOF occurrence in the Cordillera Blanca (Rivas et al., 2015; McKillop and Clague, 2007; Blown and Church, 1985; Lliboutry et al., 1977). Triggering factors for GLOF occurrence include failure of the slopes surrounding the lake, glacial ice calving or avalanching into the lake, and a narrow freeboard between the lake surface and the impounding dam (Emmer and Vilímek, 2013; Schneider et al., 2014; Emmer et al., 2016; Somos-Valenzuela et al., 2016). Longer-term predisposing factors for failure included the dam's susceptibility to erosion and the rate at which the lake volume increases over time (Hegglin

and Huggel, 2008; Vilímek et al., 2005). One factor of particular interest to this study is the influence of the dam sedimentology and structure on GLOFs.

The potential occurrence of a GLOF from Lake Palcacocha is related to a number of conditioning factors including the occurrence of frequent avalanches from the steeply sloping Palcaraju and Pulcaranra glaciers, the large volume of water stored in the lake, and the narrow freeboard between the lake surface and the top of the morainic dam that would allow the passage of even low amplitude waves over the dam (Figure 3). Of particular concern is the low stability of the frontal moraine that contains

heterogeneous layers of coarse and fine-grained sediment prone to piping processes. In addition, Lake Palcacocha lies very close to the tectonically active Cordillera Blanca Normal Fault and earthquake activity could also stimulate avalanches or failure of the dam itself (Figure 1).

Moraine dams show considerable variation in structure and form that arise from factors including the volume and mass of the associated glacier, the characteristics of the glacial sediment, and the nature of the glacier's retreat and advance cycles (Benn and Owen, 2002; Benn et al., 2003; Humlum, 1978). Although properties such as moraine height and width are presently considered as factors affecting GLOF occurrence due to their control on regulating the impact of large waves, internal structural properties such as grain size distribution, hydraulic conductivity and particle shear strength are generally overlooked, despite their role in affecting fluid flows within the moraine (Novotný and Klimeš, 2014). The presence of heterogeneous sediment bodies within the moraine dam, such as stacked and/or imbricated beds of matrix-rich and matrix-poor material, is also seldom considered. This paper describes the sedimentary characteristics and evolution of the moraine dam that currently impounds Lake Palcacocha and was breached by a GLOF, causing the catastrophic 1941 flood. Having formed during the Little Ice Age sometime between 1590 and 1720 (Klimeš et al., 2016), this moraine dam is an optimal study site because its well-exposed cross section through the breached area of the moraine allows insight into its internal sediment composition and structure (Figure 3). The lateral walls of the moraine are also well exposed along the margins of Lake Palcacocha (Figures 3 and 4).

Geological and Glaciological Setting

The Cojup Valley is a 12.5 km-long, formerly-glaciated, linear valley located in the Cordillera Blanca (Figures 1 and 2). It lies northeast of the city of Huaraz, the capital of the Ancash department. Situated at the head of this valley is Lake Palcacocha, which is dammed by a large laterofrontal moraine (Figures 3 and 4). The Cojup Valley walls are composed primarily of intrusive granodiorites and granites that make up a regional batholith (Margirier et al., 2017). The lower sections of the valley walls dip at angles of 30-40° due to the accumulation of talus deposits at their bases, but steepen to 60-80° on

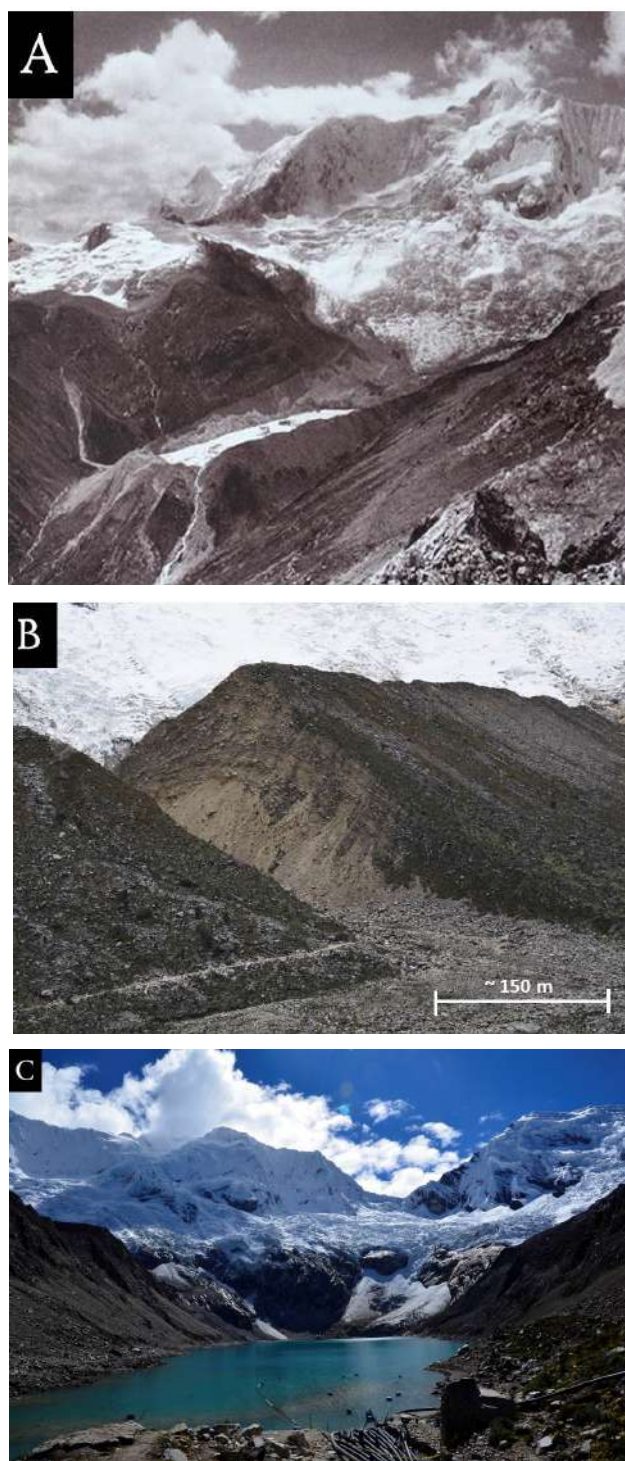


Figure 3. (A) 1940 photograph of Lake Palcacocha taken by Hans Kinzl. It is one of the few pieces of information that show the pre-flood condition of Lake Palcacocha. Photo: Kinzl and Schneider, 1950, fig. 108. (B) Exposure through the Lake Palcacocha moraine breach. The breach runs roughly N-S in direction and is positioned approximately two kilometers from the modern ice position. (C) View of Lake Palcacocha in 2017 taken from within the moraine walls, on top of one of the concrete barriers built at the southern end of the lake to increase the lake freeboard and protect the outlet. The black pipes at lower right are syphons that allow controlled drainage of water from the lake to prevent overflowing of the dam.

the upper rock faces. These higher slopes are subject to frequent snow avalanching and rock falls (Vilimek et al., 2005), both mechanisms capable of supplying

the valley with an abundance of coarse-grained debris (Benn and Owen, 2002). These slopes also supplied large volumes of supraglacial debris to the Palcaraju glacier as it retreated through the Cojup valley during the Holocene (Rodbell et al., 2009; Figure 2). This supraglacial debris insulated the glacier, muting its response to climatic pressures, and provided building material for moraines within the valley (Benn and Evans, 2010).

A series of moraines, in some cases only partial remnants, characterize the Cojup Valley. The youngest moraine, a laterofrontal complex consisting of a frontal portion and two lateral limbs (Figure 4), is found at the head of the valley, close to the Palcaraju/Pucaranra Glacier and the bases of the twin peaks Mount Palcaraju (6274 masl) and Mount Pucaranra

(6156 masl). This moraine marks the prior extent of the glacier during the Little Ice Age, sometime between A.D. 1590-1720 (Vilímek et al., 2005; Emmer et al., 2014; Rabatel et al., 2013; Solomina et al., 2007), and impounds Lake Palcacocha (4566 masl) that developed as the glacier retreated to its present position. Satellite imagery from the latter half of the 20th century shows the retreat of the Palcaraju glacier from its position in 2000 to its modern day position at the northeastern end of Lake Palcacocha (Figure 5). The moraine breached by the 1941 GLOF was reinforced in 1974 with concrete spillways to improve lake containment and the discharge of water from the lake (Somos-Valenzuela et al., 2016) (Figure 4C). Prior to 1941, a second lake, Paleolake Jircacocha, was impounded in the Cojup Valley approximately 8.3 km downstream from Lake Palcacocha. The structure damming this lake was also



Figure 4. Lake Palcacocha, at the northeastern end of the Cojup Valley with the Pucaranra Glacier lying to the northeast. The breach in the frontal moraine is the result of the 1941 outburst flood. Image source: Google Earth, 2018.

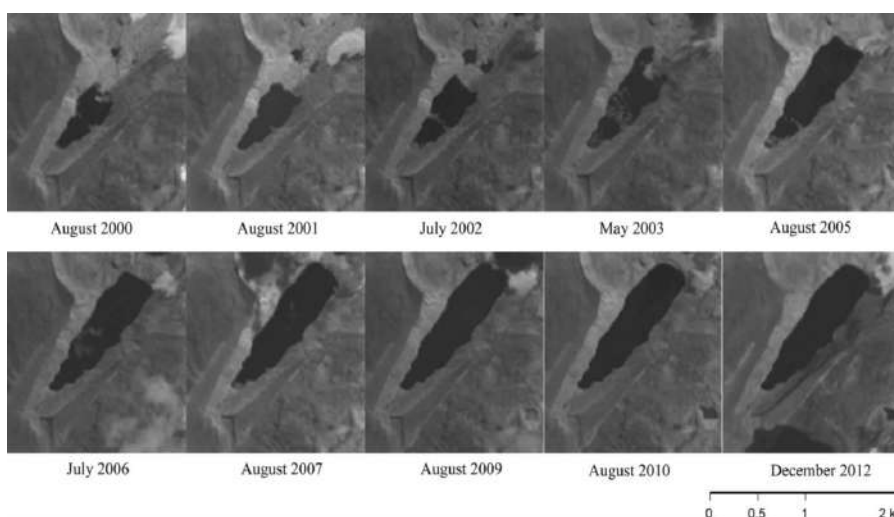


Figure 5. Aerial images showing retreat of the Palcaraju Glacier and development of Lake Palcacocha over the time interval August 2000-December 2012. Used with permission from Rivas et al., 2015, Figure 4.

destroyed during the 1941 event, allowing the waters of Lake Jircacocha (5 million m³) to be added to the floodwaters escaping from Lake Palcacocha.

Methodology

A preliminary field study was conducted in May-June 2017 to examine the sedimentology of the moraine dam at Lake Palcacocha and to determine details of its formation and structural integrity. Exposures through the breached laterofrontal moraine were photographed and examined, noting details of sediment composition including grain size, sorting, bed thickness and continuity, structures and slope. The measurement of grain size and the thickness of beds in inaccessible parts of the outcrops were estimated from the size of individuals in field photographs. The lateral limbs of the moraine were also examined and photographed from vantage points along the margins of Lake Palcacocha, noting similar sedimentary characteristics. Sedimentological features such as grain size, matrix texture, bedding and the nature of bed contacts were used to classify and code facies types to aid in the interpretation of depositional processes and environmental conditions following methodologies set out by Eyles, Eyles and Miall (1983). The predominant facies types observed were massive and poorly-stratified gravels (Gms, Gm; Table 1) interbedded with matrix- and clast-supported diamicts (Dc, Dmm; Table 1). Diamict and gravel facies were discriminated on the basis of fine-grained matrix content: diamict facies contained greater than 15% by volume of poorly sorted matrix consisting of fine-grained sand and minor silt, whereas

gravel facies contained less than 15% by volume of fine-grained matrix material (Table 1). Wherever possible, the exposures were cleaned of surficial materials and examined at close range, although this was difficult in many places due to the steepness of the exposures and the coarse-grained nature of the sediment. Consequently, the descriptions of sediment characteristics at some locations are made on the basis of photographic analysis and comparison with more accessible sites.

Results

General Morphology of the Palcacocha Moraine Complex

The moraine impounding Lake Palcacocha is a narrow (approximately 300 m), U-shaped laterofrontal complex characterized by a frontal rampart branching into two lateral limbs that run roughly parallel with the valley walls and have an external perimeter of 5 km (Figure 4). Clapperton (1972) proposed a four-type classification system for moraines in the Cordillera Blanca. His Group-4 moraines, which tend to inhabit altitudes around 4750 masl, cluster close to receding glacier snouts, develop hummocky topography just inside their terminal rim, and tend to be highly weathered. The Lake Palcacocha moraine clearly fits these Group-4 criteria (Figure 6). Numerous talus deposits can also be seen lining the base of both the inner and outer slopes of the moraine, implying that the moraine is subject to ongoing erosive, alluvial, and mass wasting processes (Figure 7).

Table 1. Facies codes used to describe the sediments composing the Lake Palcacocha moraine. The dominant facies are massive (Gms) or stratified gravels (Gm). Units of matrix-supported diamict (Dmm) and clast-supported diamict (Dc) are also present. Most clasts are subangular to angular.

Facies Code	Description
Dc	Clast-supported diamict. Very poor sorting with some fines and sand. Clasts are in contact with one another, with interclast spaces filled by fines and sands.
Dmm	Matrix-supported diamict. Very poor textural sorting. Clasts are supported by a sand-rich matrix (>15% by volume) containing some silt.
Gms	Massive, matrix-supported gravel. Poor sorting, with variable clast sizes and <15% sand-rich matrix. Clasts may or may not be in contact with one another.
Gm	Crudely-bedded gravel. Poor sorting, with variable clast sizes and minor amounts of sand-rich matrix. Clasts may or may not be in contact with one another.

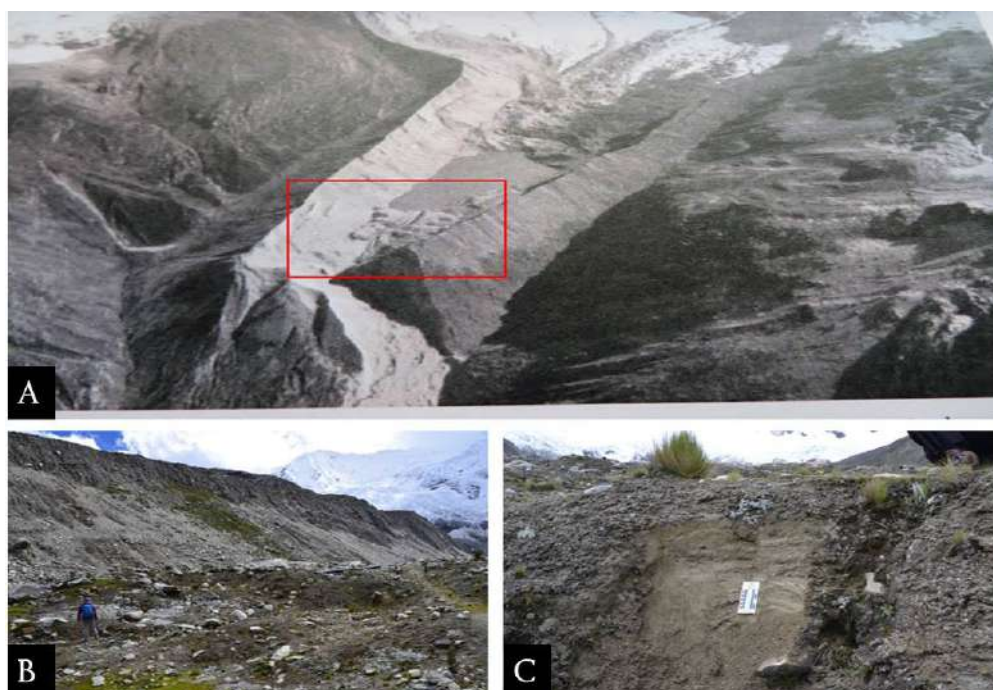


Figure 6. (A) Aerial photo of Lake Palcacocha taken on September 7, 1947, six years after the GLOF. Area highlighted in red shows hummocky topography characteristic of buried ice melting out beneath a cover of sediment. Photo: A. Heim, 1948, fig. 162. (B) Hummocky region shown in Figure 6A in June, 2017. (C) Exposure of crudely-bedded sands and laminated silts in hummocky region at southern end of Lake Palcacocha.



Figure 7. View of Lake Palcacocha (June 2017) looking north from the concrete dam position referred to in Figure 3. Note steep moraine walls and talus deposits lining the base of the slopes.

While detailed observations at the lake began in 1941 following the Palcacocha GLOF, the lake is surmised to have had a pre-flood volume of 9-11 million m³ (Somos-Valenzuela et al., 2016). The 1941 GLOF resulted in a significant reduction in the lake volume, possibly to as low as 1 million m³ (Vilímek et al., 2005). Since the 1941 breach, the lake has continued to grow and the modern lake is up to 70 m deep with an area of approximately 514,157 m² (bathymetry February, 2016, Glaciology and Water Resources Unit-ANA, Huaraz; Figure 4; Emmer et al., 2014). At present, Lake Palcacocha with a volume of 17.4 Mm³ is spatially and volumetrically larger than most of the lakes in the surrounding valleys (Figure 2).

Laterofrontal Moraine Breach

The 1941 GLOF at Lake Palcacocha produced a sizable breach in the southern part of the laterofrontal moraine, exposing the internal structures of the SE moraine limb and the southern portion of the frontal moraine (Figure 8). Using digital topography generated by Google Earth, the breach measures approximately 100 m in height, 350 m along its base length, and 30 m wide. This opening marks the channel through which the deluge of water, ice, mud, and boulders was released, and is likely the result of an initial overtopping of the moraine followed by



Figure 8. Coarse-grained sediment exposed within the SE lateral limb of the breach. Black pipes are drainage pipes from the lake (see Figure 3C). Sediment samples collected from this part of the moraine were found by Novotny and Klimeš (2014) to be exceptionally coarse-grained relative to the other moraines in surrounding valleys.



Figure 9. Sedimentological zones (A–D) identified within the Lake Palcacocha laterofrontal moraine. These zones are identified on the basis of the sedimentary characteristics of the moraine observed from locations along the lakeshore. These characteristics are transitional from one zone to another. Image source: Google Earth, 2018.

rapid enlargement from floodwater erosion (Kershaw, Clague and Evans, 2005; McKillop and Clague, 2007). The breach represents the part of the moraine that was compromised in the GLOF. Photographs taken in 1940 prior to the flood indicate a meltwater outlet stream running over the top of the moraine where the breach formed a year later (Figures 3A-B).

Sedimentological and Structural Characteristics of the Palcacocha Moraine Complex

Sediments within the Lake Palcacocha laterofrontal moraine are exceptionally coarse-grained and consist primarily of clast-supported diamict and massive and crudely-stratified gravels (Figure 8, Table 1). Four broad sedimentological zones could be identified within the Lake Palcacocha laterofrontal moraine complex: Zone A (furthest from the ice front, i.e., closest to the breach), B, C, and D (closest to the ice front; Figure 9). The areas immediately adjacent to the ice front were not examined due to accessibility issues. While the lateral components of the moraine comprise two distinct lateral limbs, southeast (SE) and northwest (NW), the sedimentary zones identified here are relatively consistent across both lateral limbs (Figure 10). The lateral limbs unite at the frontal portion of the moraine and would be continuous were it not for the breach.

Zone A (Breach): Zone A consists of sediment exposed within the east and west face on either side of the 1941 breach (Figures 8, 9 and 10). Both the east and west breach faces are characterized by alternating inclined beds of diamict (Dmm/Dc) bounded by relatively planar clast-rich gravel beds (Gms; Table 1, Figure 11). The diamict units range in thickness from

2-10 meters and have a coarse-medium grained sandy matrix containing a dense concentration of large sub-angular to angular clasts exhibiting poor sorting (Dc, Dmm; Figure 11). In contrast, gravel beds bounding the diamict units are clast supported and contain lesser amounts of matrix (Figure 11). The alternating beds of diamict and gravel are dipping to the north

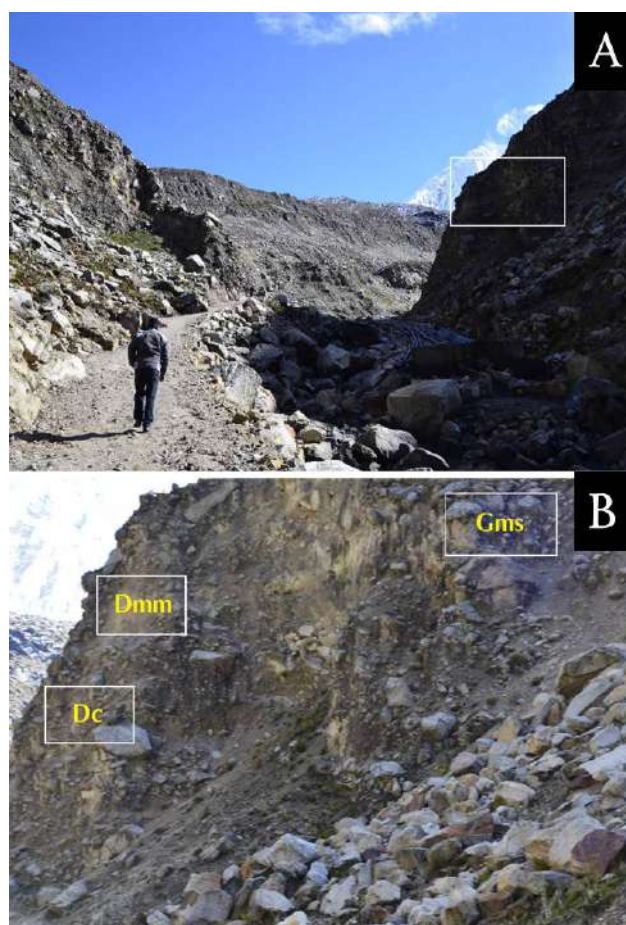


Figure 10. (A) View of the east and west faces of the breach corridor. White box shows position of B. (B) Sedimentary facies exposed in the east face of the breach corridor, with Dmm, Dc, and Gm facies highlighted. See Table 1 for facies codes.



Figure 11. Alternating beds of coarse-grained, massive matrix-supported gravel (Gms) and clast- and matrix-supported diamict (Dc, Dmm) exposed in the eastern face of the breach in Zone A. Beds dip toward the north at angles of between 20° and 25° to the horizontal. See Table 1 for facies codes.

at angles of 20°-25° relative to horizontal. Novotny and Klimeš (2014) remarked that sediments exposed in the breach (their Group A) had a fines-sand-gravel (FSG) ratio of 11:19:70, which is consistent with our field estimation of the texture of Gms facies (Table 1, Figure 11). A second, more matrix-rich sediment group (their Group B, our Dc, Dmm; Table 1, Figure 11), characterized by a FSG ratio of 21:64:15, is also noted by Novotny and Klimeš (2014). The sediments exposed in the Palcacocha breach are particularly coarse-grained and lack the fine-grained matrix documented by Novotny and Klimeš (2014) at moraines impounding nearby lakes Tullparaju, Cuchillacocha, and Uruashraju (Figure 2 in Novotny and Klimeš, 2014).

Zone B: Zone B (Figure 9) begins on the SE lateral limb near the 1941 breach and extends approximately 300 m towards the present day ice margin. Zone B on the NW lateral limb extends approximately 530 m from the breach (Figure 9). The greatest difference between Zone A and Zone B is the absence in Zone B of the alternating beds of gravel beds and diamict.

The sediments of both the SE and NW lateral limbs of Zone B are predominantly massive gravels (Gms), with some localized crudely-bedded horizons (Gm; Figure 12). Clasts are sub-angular to angular, and poorly sorted. Localized pockets of better-sorted clasts also occur in this zone. They are most likely sourced from the regional batholith and are composed predominantly of granodiorite (Margirier et al., 2017). The SE lateral limb also contains an abundance of clasts coated in iron oxides (Figure 13B), which are absent in the NW lateral limb and indicate a different sediment source (Figure 12B). The NW lateral limb exhibits a number of scarp faces on which talus has accumulated obscuring underlying sediment (Figure 12B).

Stratification can be observed in both the SE and NW lateral limbs of Zone B, but bed boundaries are comparatively uneven and deformed, and alternate between massive (Gms) and crudely-stratified (Gm) gravel units that contain varying amounts of coarse-grained matrix (Figure 12). The beds exposed in each lateral limb appear to angle upwards in the ice-proximal direction, pinching out towards the crest of the moraine. On the SE lateral limb, beds range in thickness from 3 to 5 meters, and dip 5°-10° to the north, steepening to 45°-70° towards the moraine

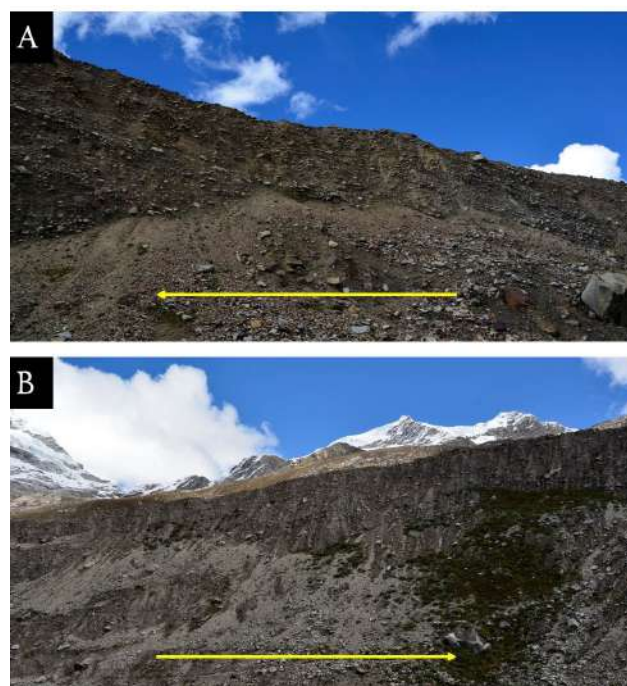


Figure 12. (A) Stratification of the SE lateral limb of Zone B, with alternating beds of massive and crudely stratified gravels with variable coarse-grained matrix content. Beds appear to angle upwards towards the moraine crest. (B) Stratification exposed within the NW lateral limb of Zone B, with slightly deformed and more clast-rich units juxtaposed. Yellow arrows on both photographs represent direction of ice retreat.

crest (Figure 13). On the NW lateral limb, individual gravel beds range in thickness from 6 to 11 meters, and also dip 5°-10° towards the north, steepening to 30°-40° toward the moraine crest (Figure 12).

Zone C: The sediments of Zone C are predominantly gravels (Gm, Gms; Figures 14 and 15). Clasts are sub-angular to sub-rounded ranging in size from 2 cm to >2 m on the SE lateral limb (Figure 14), and as large as 3-5 meters on the NW lateral limb (Figure 15). The main difference between the facies exposed in the SE and NW lateral limbs of Zone C is in the form of the bedding. The SE lateral limb exposes two horizontal matrix-rich beds, approximately 5-7 meters thick (Figure 14) that are cross-cut by a vertical structure that dips slightly up-valley towards the ice margin. Sediment characteristics are largely unchanged across the structure, with the exception of the lowermost bed that appears more clast-rich on the ice-distal side of the structure (Figure 14). In contrast, the NW lateral limb of Zone C contains numerous alternating, 6 to 11 meter-thick, clast-rich and matrix-rich beds (Figure 15) that appear to be continuous with those seen in the NW lateral limb of Zone B. The beds dip toward

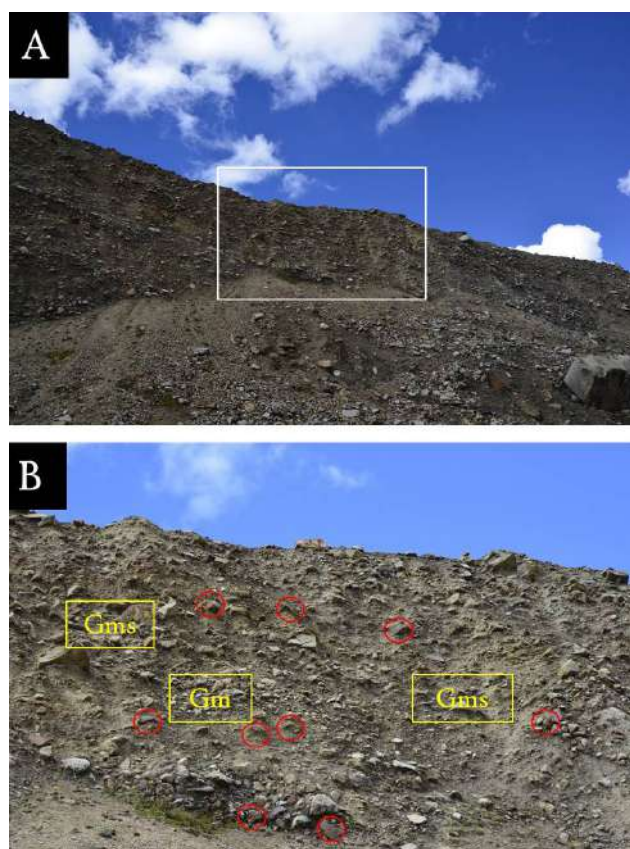


Figure 13. (A) SE lateral limb of Zone B. White box indicates location of image B. (B) Alternating massive and crudely bedded gravels exposed in the SE lateral limb of Zone B. Red circles indicate the presence of iron-rich clasts. See Table 1 for facies codes.

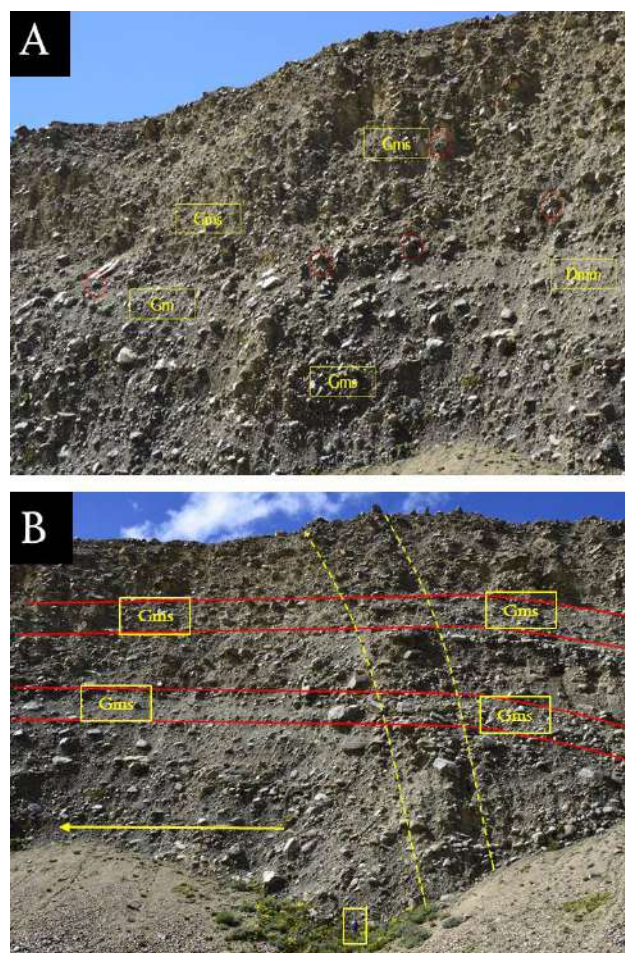


Figure 14. (A) Sediments exposed in the SE lateral limb of Zone C. Red circles indicate presence of clasts coated with iron oxide. (B) Stratification of massive and crudely stratified gravel beds exposed in the SE lateral limb of Zone C (beds delineated by red lines). Dashed yellow lines indicate vertical structure cross-cutting horizontal beds. Scale figure at bottom (outlined in yellow) is 1.5 m. Yellow arrow represents direction of ice retreat.

the north at 5°-10° and undulate across the section, pinching out as they curve towards the moraine crest (Figure 15C). The NW lateral limb also contains a greater abundance of talus deposits at the slope base (Figure 15A).

Zone D: This zone is closest to the modern glacier margin and consists predominantly of crudely stratified gravels (Gm; Figure 16). These can be seen clearly in areas where recent debris flows have removed the veneer of surficial sediment (Figure 16). Outcrops of moraine sediment are largely inaccessible in this region and sediment characteristics were analyzed from photographs taken along the lake shoreline.

Discussion: Development of the Lake Palcacocha Moraine

The Palcaraju/Pucaranra Glacier likely began its retreat up the Cojup Valley at the termination

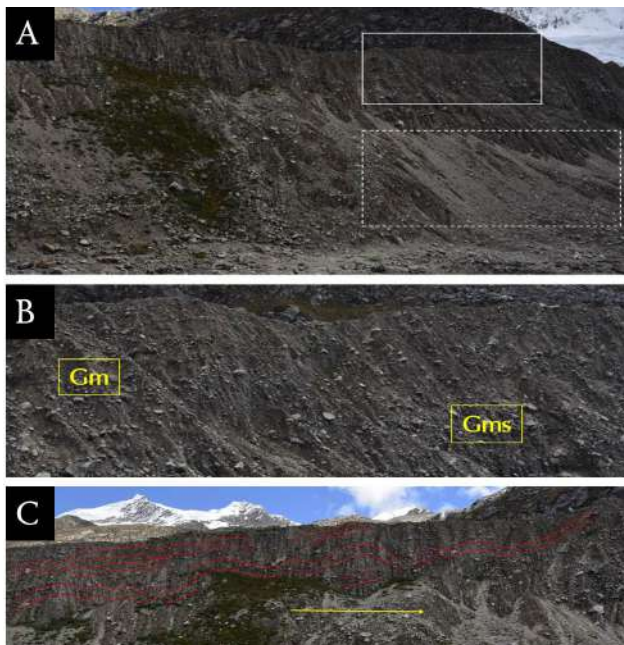


Figure 15. (A) NW lateral limb of Zone C. Dashed box outlines area covered by talus deposits. Solid box indicates location of image B. (B) Alternating beds of massive and crudely stratified gravel. See Table 1 for facies codes. (C) Stratification of the NW lateral limb of Zone C, with beds delineated by red lines. Beds are somewhat continuous with those of Zone B, exhibiting similar deformation, and are generally clast-rich. Yellow arrow represents direction of ice retreat.

of the Late Glacial Maximum, approximately 13.3 Ka (Rodbell et al., 2009). As the glacier began this retreat, it was likely mantled with a considerable volume of supraglacial debris contributed by avalanches and rockfall from the high valley walls of the Cojup Valley (e.g., Benn and Owen, 2002). The Lake Palcacocha moraine began to develop sometime between A.D. 1590 and 1720, during the LIA in the Cordillera Blanca (Emmer et al., 2014; Rabatel et al., 2013). Based on the observations made during this study, a speculative series of events involved in the formation of the moraine is proposed below (Figure 17).

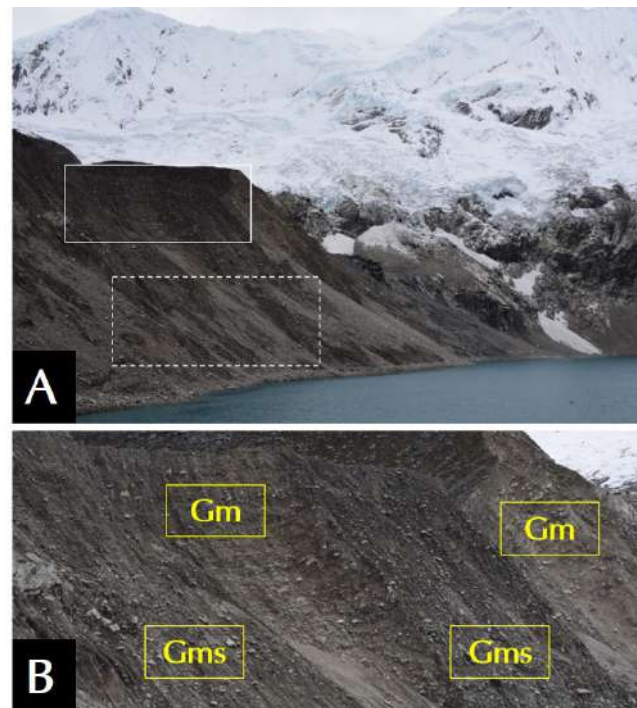


Figure 16. (A) NW lateral limb of Zone D. Dashed box indicates talus deposits. Solid outline indicates location of image B. (B) Crudely-stratified gravels of Zone D (Gm) exposed by recent debris flows. This zone lies closest to the modern glacier margin (see Figure 9).

Phase 1: Embryonic Moraine

Climatic changes following the LGM allowed the Palcaraju/Pucarana Glacier to retreat close to its present position. Subsequent cooling in the Cordillera Blanca during the LIA allowed the glacier to advance to the position of the breached frontal portion of the moraine and maintain its position there for some time. At this time, the large amount of sediment delivered by the glacier from both supraglacial and subglacial sources began to form an embryonic moraine (Figure 17) as meltstreams were unable to efficiently transport the volume of sediment away from the glacier

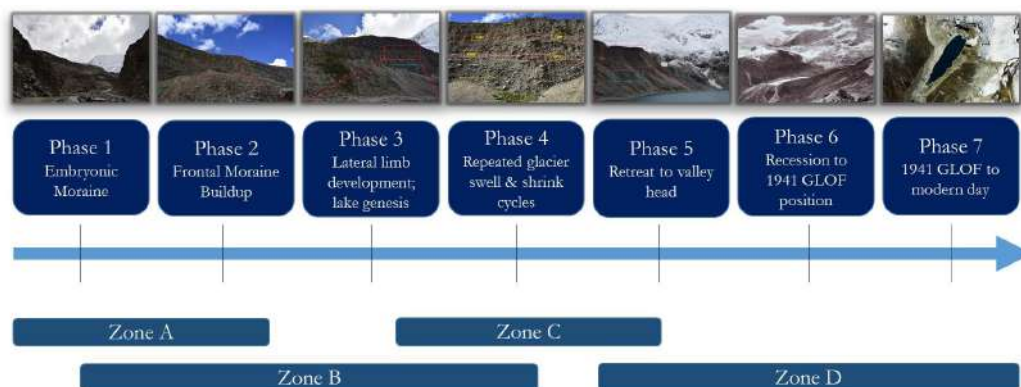


Figure 17. Speculative phases of development of the Lake Palcacocha laterofrontal moraine complex. The moraine began to form (Phase 1) during the LIA (A.D. 1590-1720), and the subsequent retreat of the Palcaraju/Pucarana Glacier can be classified into seven descriptive phases that resulted in the development of four transitional sedimentological zones (A-D).

(Shroder et al., 2000). This initial moraine, extending around the frontal margin and partially around the lateral flanks of the glacier, then served to impede the glacier from re-advancing further down-valley (Boulton and Eyles, 1979; Owen and Derbyshire, 1993; Benn and Owen, 2002).

Phase 2: Progressive Buildup of Frontal Moraine

The characteristics of the Lake Palcacocha moraine reported here suggest that, following the formation of the embryonic moraine, the Palcaraju/Pucaranra Glacier showed muted responses to climatic fluctuations that are known to have characterized the LIA (Vuille, Kaser and Irmgard, 2008) by shifting its behavior from one of marginal advance/retreat (i.e., that which it had experienced as it traversed the Cojup Valley) to a regime of shrinking and swelling in size (e.g., Benn and Evans, 2010). During conditions favorable to enhanced ablation rates, the Palcaraju/Pucaranra Glacier likely shrank in thickness and extent, depositing its supraglacial debris cover on the foreland between the glacier margin and the embryonic rampart. As conditions changed and became more favorable for ice accumulation and growth, the glacier swelled in response, bulldozing the foreland debris forward and overtop the embryonic moraine, adding to both its height and width. This episodic growth of the ice mass and subsequent overthrusting of foreland debris onto the moraine is a likely explanation for the interbedded matrix-rich diamict units observed in Zone A (Figure 11). The bulldozed debris would likely have experienced some minor sorting, by mass flow and meltwater reworking. Clays and silts retained in low-energy ponded zones may have been incorporated, along with fluvially-sorted sands and small clasts, into the bulldozed debris to produce a more matrix-rich diamict. The debris would be partially mixed by subglacial and ice marginal processes and thrust onto the embryonic moraine during glacier advance/swelling. During these periods of ice advance, coarse-grained debris would also melt out directly from the glacier onto the growing moraine (e.g., Humlum, 1978; Benn and Evans, 2010; Benn and Owen, 2002). This process would allow for the accumulation of gravelly (Gm/Gms) units supplied directly from the ice, with interbedded diamict units (Dmm, Dc) generated by the incorporation of finer-grained matrix sediments during bulldozing of foreland deposits (Figures 10 and 11). Repetitions of these alternating modes of deposition occurred as the ice margin shrank and swelled in response to climatic

forcing, progressively enlarging the frontal section of the moraine, and contributed to the development of the lateral limbs.

Phase 3: Lateral Limb Development and Birth of Lake Palcacocha

It is likely that the thick supraglacial debris cover on the Palcaraju Glacier would have decreased melt rates, allowing it to remain stationary at the limits imposed by the embryonic moraine until a significant change in mass balance forced it out of equilibrium (Benn and Evans, 2010; Benn et al., 2003). During periods of enhanced melt when the glacier shrank back from the frontal portion of the moraine, it is probable that the lateral flanks continued to develop as debris was deposited in ablation valleys between the ice and the lateral moraine walls (Benn et al., 2003). Debris accumulating in the lateral ablation valleys would have been similar to the debris found in the glacier foreland discussed above. During intervals of positive mass balance, the Palcaraju/Pucaranra Glacier would push this material towards and overtop of the pre-existing lateral limbs, contributing to their buildup and creating the structures presently seen in Zone B.



Figure 18. Hans Kinzl's 1939 photographs of Lake Palcacocha and the Palcaraju/Pucaranra Glacier taken from the southwest. Photos: Kinzl and Schneider, 1950, figs. 106-107.

The large amount of clast-rich sediment in the lateral portions of the moraine suggests direct rockfall was an important input into ablation valleys. Furthermore, the presence of iron-rich clasts in the SE lateral limb of Zone B, and their absence in the NW lateral limb, suggests a localized supply of material from nearby bedrock outcrops. It is reasonable to assume that Lake Palcacocha may have begun to develop during Phase 3 as the glacier would have pulled far enough back from the frontal portion of the moraine to allow meltwater to accumulate. Hummocky topography, characteristic of ice melting out beneath a cover of sediment, is apparent within the rim of the frontal

moraine and may record ice margin wastage and stagnation below a cover of supraglacial debris (Benn and Evans, 2010) and/or the development of a lake over the thinning ice during back-wasting (Figure 6; Hambrey et al., 1997).

Phase 4: Repeated Glacier Swell and Shrink Cycles

As the Palcaraju/Pucaranra Glacier margin continued to retreat from the frontal moraine in response to climatic forcing factors, depositional activity shifted primarily from Zone B to Zone C. The horizontal strata in Zone C (Figure 14) are likely to have formed in a similar fashion to those described in Phase 3, with debris in the ablation valley being pushed laterally and overtop of the moraine as the glacier periodically swelled in response to accumulation-favorable conditions.

Phase 5: Retreat to Valley Head

The transition of the Palcaraju/Pucaranra Glacier margin from Zone C to Zone D is not well documented as facies observations for this region are of a low resolution. Large talus cones have developed along the base of the moraine slopes and it is difficult to discriminate distinct bedding within the upper slopes. As the glacier retreated onto the steep rock walls at the head of the valley, a broad, bowl-shaped area was created between the lateral moraine crests (Figures 3, 4 and 5). This records a change in the morphology of the Palcaraju/Pucaranra Glacier from tongue to lobe-shaped.

Phase 6: Recession to 1941 GLOF Position

The Palcaraju/Pucaranra Glacier was likely in a position relatively close to the ice-proximal end of Zone D immediately prior to the 1941 GLOF event. In 1939 and 1940, about two years prior to the flood, Austrian geographer Hans Kinzl took several photographs of Lake Palcacocha: a distant oblique view, from the valley walls to the south (Figure 3A) and a head-on view taken from the southwestern shore of the lake (Figure 18).

Figure 3A shows the former Lake Palcacocha and the narrow freeboard that existed between its surface and the top of the moraine prior to the flood. The elevation of the lake level in 1940 was 4610 masl (Vilímek et al., 2005); the modern lake level is 4566 masl. Despite this 43-meter difference, the

modern lake volume exceeds 17 million m³ (Emmer et al., 2014), which is significantly larger than the estimated 9-11 million m³ prior to the flood (Vilímek et al., 2005). A precise estimate of the ice frontal position in 1940 is challenging given that it was likely partially covered by the lake as is shown in the post-flood aerial photo from 1947 (Figure 6A). However, Kinzl's shore photo and the post-flood 1947 aerial photo suggest a plausible position for at least a portion of the Palcaraju/Pucaranra glacier margin proximal to Zone D. The photographs also show that by 1940, the development of the laterofrontal moraine complex had concluded. The moraine had developed a meltwater outlet flowing over a topographic low in its crest (Figure 3A). This low area would form the outlet for the GLOF that occurred just one year later.

Phase 7: 1941 GLOF to Modern Day

On December 13, 1941, the southernmost portion of the Palcacocha moraine was breached and released a GLOF that devastated the city of Huaraz. The GLOF was likely triggered by an impact wave caused by the sudden release of a large amount of ice from the glacier into the lake, and the lake itself was almost emptied. The flood occurred during the wet season, so heavy precipitation may have triggered an avalanche that in turn triggered the flood (Vilímek et al., 2005). Floodwaters armed with debris and ice blocks travelled down the length of the Cojup Valley, severely damaging the city of Huaraz (Wegner, 2014) (Figure 2B). The 1941 event resulted in the onset of intensive monitoring and study of Lake Palcacocha and several other cordilleran lakes that are prone to the generation of GLOFs.

The aerial photograph taken in 1947 shows the lake shortly after the GLOF occurred and with the newly-formed breach in the southernmost moraine wall (Figure 6A). This image also shows the position of the Palcaraju Glacier margin, extending well past the base of the slopes of Zone D. The SE portion of the glacier is mantled with considerably more debris than the NW part (Figure 6A) and appears to have resulted from an avalanche from the SE valley slopes onto the glacier surface.

An aerial photo taken in 1970 shows the position of the ice front to be similar to that recorded in 1940/1947 (Vilímek et al., 2005). Another aerial image, taken in 1984 by SPOT, shows only a slight retreat of the glacier from its 1970 position. This implies that the

glacier margin experienced relatively little retreat between 1940 and 1984. However, a LANDSAT image taken in 1999 shows that the ice margin underwent dramatic retreat after 1984. Vilímek et al. (2005) suggest that this retreat was as much as 340 m over the 15-year period. A second LANDSAT image taken in 2003 shows the ice margin having retreated over 530 m during the four years between 1999 and 2003. Altogether, these images demonstrate a total of 760 m of glacial recession from 1970 through to 2003. Klimeš et al. (2016) observed that, between 2003 and 2011, there was a further 440 m of marginal retreat, and the glacier effectively lost contact with the lake by 2012. However, meltwater from the diminishing glacier continues to feed the lake, the level of which is now controlled by pumping (Figure 3C) and which has an estimated volume of 17 million m³ (Klimeš et al., 2016).

Future Stability of the Lake Palcacocha Laterofrontal Moraine

In the oblique slope photo taken by Hans Kinzl in 1940 (Figure 3A), a meltwater outlet can be seen flowing over the top of the moraine. This outlet lies in the same position as the breach that occurred in the moraine and released the GLOF in 1941. It appears that the impact wave caused by the sudden avalanche of ice into the lake overtopped the moraine dam and exploited the lowest and weakest part of the moraine as a focus for the release of water. Thus, current efforts being made to strengthen and protect the integrity of the modern lake outlet and increase the freeboard between the water surface and the moraine crest are highly appropriate. However, the internal sediment composition and stratigraphy of the moraine itself must also be taken into consideration as these factors can determine which areas of a moraine dam are predisposed to collapse or failure. The juxtaposition of coarse-grained gravel-rich horizons with finer-grained matrix-rich horizons in an impounding lake dam can create conditions under which water can more easily infiltrate into the coarse units that may become destabilized or ‘washed out’ and can undermine the finer-grained horizons, destabilizing the entire structure. The orientation of sedimentary units and structures within the moraine can also exert a strong control on the stability of the structure by determining drainage pathways and the angle of potential failure surfaces. It is therefore important to identify the structure and spatial variability of sediments with varying textural characteristics in a

moraine dam and to monitor areas of water seepage to identify any zones of potential failure.

Conclusions

This paper has used field observations made at the Lake Palcacocha laterofrontal moraine to identify its sedimentary and structural characteristics and to propose a relative timeline for the processes involved in its development. The moraine is composed primarily of coarse-grained gravel facies with minor amounts of interbedded diamict that show variable structure and orientation within the moraine. Four transitional zones of deposition can be identified within the moraine (Zones A – D), which span the distance from the frontal area where the breach occurred in 1941 (Zone A) to the lateral regions closest to the modern day Palcaraju/Pucaranra Glacier (Zone D; Figure 10). The moraine appears to have formed through a multistage process that involved numerous small scale episodes of growth and shrinkage by the Palcaraju/Pucaranra Glacier margin. A speculative 7-phase timeline describing the development of the moraine is proposed, beginning during the Little Ice Age when the glacier margin advanced to the position of the frontal portion of the moraine and concluding at the present day (Figure 17). There are no absolute age dates available for any of the morainal features, but the timeline proposed is congruent with photographic records of the glacier and lake made following the 1941 GLOF.

This study must be viewed as a first attempt to document the detailed sedimentology of a large lake-impounding moraine. More extensive fieldwork, including geophysical studies, detailed sedimentary logging of sections and age-dating of any organic material found, would provide higher-resolution results. Current GLOF hazard assessment criteria related to dam structure and integrity do not fully consider the broad structural and sedimentological variability exhibited by moraine dams. Enhanced understanding of these variations could identify potentially hazardous elements to be included as part of hazard assessment procedures for GLOF likelihood and occurrence. However, observations of the internal composition and structure of moraine dams pose a challenge and require not only documentation of exposures through dams breached by failures but also an understanding of the depositional processes involved in dam formation. It is worthy to note that the moraines damming lakes in the nearby valleys

of Tullparaju and Cuchillacocha, contain significant horizons of fine-grained lacustrine sediment and may also be at risk of failure as adjacent glaciers continue to retreat and the volume of lake waters increases.

As global temperatures continue to warm, the retreat of tropical glaciers will result in the formation of new moraine dams and glacial lakes. Given substantial increases in the volume of water impounded by moraine dams in the Cordillera Blanca and the growing risk of additional GLOFs, detailed investigation of the formation of moraines in this region must be a priority. The dramatic acceleration of the Palcaraju Glacier's retreat during the last half of the 20th century illustrates the way in which tropical glaciers can respond to contemporary climatic pressures. As glaciers continue to retreat and spawn new lakes, GLOFs are expected to increase in frequency and magnitude. It is therefore critical to understand how these glaciers will develop moraines in the 21st century, and how their development will influence the regulation and occurrence of future flooding events.

References

- Benn, D. and Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and glaciation* (2nd ed.). London, Hodder Education.
- Benn, D. I., Kirkbride, M. P., Owen, L. A. and Brazier, V. (2003). Glaciated valley landsystems. In Evans, D. J. A. (Ed.). *Glacial landsystems*, 372-406. New York, Routledge.
- Benn, D. and Owen, L. (2002). Himalayan glacial sedimentary environments: A framework for reconstructing and dating the former extent of glaciers in high mountains. *Quaternary International*, 97-98, 3-25.
- Blown, I. and Church, M. (1985). Catastrophic lake drainage within the Homathko River basin, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4), 551-563.
- Boulton, G. S. and Eyles, N. (1979). Sedimentation in valley glaciers: a model and genetic classification. In Schlüchter, C. (Ed.). *Moraines and varves; Origin, genesis, classification*, 11-24. Proceedings of an INQUA symposium on genesis and lithology of Quaternary deposits, Zürich, 10-20 September 1978. Rotterdam, A. A. Balkema Publishers.
- Clapperton, C. M. (1972). The Pleistocene moraine stages of west-central Peru. *Journal of Glaciology*, 11(62), 255-263.
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V. and Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269-279.
- Emmer, A. and Vilímek, V. (2013). Review article: Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: An example from the Cordillera Blanca (Peru). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1551-1565.
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. and Cochachin, A. (2014). Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca, Peru. In Shan W., Guo, Y., Wang, F. Marui, H. and Strom, A. (Eds.). *Landslides in cold regions in the context of climate change*, 231-252. Cham, Switzerland, Springer.
- Eyles, N., Eyles, C. H. and Miall, A. D. (1983). Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences. *Sedimentology*, 30(3), 393-410.
- Hambrey, M. J., Huddart, D., Bennett, M. R. and Glasser, N. F. (1997). Genesis of "hummocky moraines" by thrusting in glacier ice: Evidence from Svalbard and Britain. *Journal of the Geological Society*, 154, 623-632.
- Hegglin, E. and Huggel, C. (2008). An integrated assessment of vulnerability to glacial hazards. *Mountain Research and Development*, 28(3/4), 299-309.
- Heim, A. (1948). *Wunderland Peru, Naturerlebnisse*. Bern, Verlag Hans Huber.
- Horstmann, B. (2004). Glacial lake outburst floods in Nepal and Switzerland, new threats due to climate change. 1-12. Berlin, Germanwatch. <https://germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/publication/3647.pdf>
- Humlum, O. (1978). Genesis of layered lateral moraines: Implications for palaeoclimatology and lichenometry. *Geografisk Tidsskrift*, 77, 65-72.
- Kershaw, J. A., Clague, J. J. and Evans, S. G. (2005). Geomorphic and sedimentological signature of a two-phase outburst flood from moraine-dammed Queen Bess Lake, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(1), 1-25.
- Kinzl, H. and Schneider, E. (1950). *Cordillera Blanca (Perú)*. Innsbruck, Universitäts-Verlag Wagner.

- Klimeš, J., Novotný, J., Novotná, B., de Urries, B. J., Vilímek, V., Emmer, A.,... Frey, H., (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: Example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*, 13(6), 1461–1477.
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A. and Schneider, B. (1977). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention, *Journal of Glaciology*, 18(79), 239-254.
- Margirier, A., Audin, L., Robert, X., Pêcher, A. and Schwartz, S. (2017). Stress field evolution above the Peruvian flat-slab (Cordillera Blanca, northern Peru). *Journal of South American Earth Sciences*, 77, 58–69.
- Mark, B. G., Bury, J., McKenzie, J. M., French, A. and 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.
- McKillop, R. J. and Clague, J. J. (2007). A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Natural Hazards*, 41(1), 131-157.
- Neal, E. G. (2007). *Hydrology and glacier-lake outburst floods (1987–2004) and water quality (1998–2003) of the Taku River near Juneau, Alaska*. Scientific Investigations Report 2007-5027. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey.
- Novotný, J. and Klimeš, J. (2014). Grain size distribution of soils within the Cordillera Blanca, Peru: An indicator of basic mechanical properties for slope stability evaluation. *Journal of Mountain Science*, 11(3), 563–577.
- Owen, L. A. and Derbyshire, E. (1993). Quaternary and Holocene intermontane basin sedimentation in the Karakoram Mountains. In Schroder, J. F. Jr. (Ed.). *Himalaya to the sea: Geology, geomorphology and the Quaternary*, 68-82. London, Routledge.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, 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.
- Reynolds, J. M. (1992). The identification and mitigation of glacier-related hazards: Examples from the Cordillera Blanca, Peru. *Geohazards*, 143–157.
- Richardson, S. D. and Reynolds, J. M. (2000). An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65-66, 31–47.
- Rivas, D. S., Somos-Valenzuela, M. A., Hodges, B. R. and McKinney, D. C. (2015). Predicting outflow induced by moraine failure in glacial lakes: The Lake Palcacocha case from an uncertainty perspective. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1163-1179.
- Rodbell, D. T., Smith, J. A. and Mark, B. G. (2009). Glaciation in the Andes during the Lateglacial and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 28(21-22), 2165-2212.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillen, S. and Garcia, J. (2014). Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, 35, 145–155.
- Shroder, J. F., Bishop, M. P., Copland, L. and Sloan, V. F. (2000). Debris-covered glaciers and rock glaciers in the Nanga Parbat Himalaya, Pakistan. *Geografiska Annaler, Series A - Physical Geography*, 82(1), 17-31.
- Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B. and Pouyaud, B. (2007). Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: “Little Ice Age” moraine chronology. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 225-235.
- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., McKinney, D. C. and Rivas, D. (2013). [Abstract] Hazard map in Huaraz-Peru due to a glacial lake outburst flood from Palcacocha Lake. American Geophysical Union, fall meeting 2013.
- Somos-Valenzuela, M. A., Chisolm, R. E., Rivas, D. S., Portocarrero, C. and McKinney, D. C. (2016). Modeling a glacial lake outburst flood process chain: The case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6), 2519-2543.
- Vilímek, V., Zapata, M. L., Klimeš, J., Patzelt, Z. and Santillán, N. (2005). Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides*, 2(2), 107-115.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. and Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96.
- 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 Cambio Climático.” Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).

Efecto de la Estacionalidad Climática y sus Implicancias para el Manejo de un Pastizal de Puna de la Cordillera Blanca, Ancash, Perú

Seasonal Climatic Effect and Its Implications for Management of a Puna Rangeland in the Cordillera Blanca, Ancash, Peru

Beatriz Fuentealba¹, Dennys Villacaqui¹, Ángel Mendoza¹ y Luis Armas¹

¹Instituto de Montaña (The Mountain Institute), Huaraz, Ancash

Resumen

El sobrepastoreo se reconoce como una de las principales amenazas para la integridad ecológica de los pastizales de puna. Sin embargo, es poco lo que conocemos sobre los procesos ecológicos que mantienen la producción de biomasa y la composición florística de los diferentes tipos de pastizal existentes en los Andes, que es la base para dar buenas recomendaciones de manejo ganadero. Por ello, este trabajo busca caracterizar los tipos de pastizal presentes en el área de estudio y evaluar la respuesta que la vegetación tiene, en cada tipo de pastizal, durante la época de lluvias. El área de estudio es un pastizal de puna ubicado a 4000 msnm, en la comunidad campesina de Canray Grande (Cordillera Blanca, Ancash, Perú). Para la caracterización, se identificaron las comunidades vegetales dominantes y se establecieron transectos fijos, que fueron evaluados trimestralmente durante nueve meses. Además, se tomaron muestras de suelo para medir la densidad aparente y la biomasa aérea disponible. Los resultados muestran tres tipos de pastizal: pajonal de *Festuca*, pajonal mixto y césped de puna, cada uno con un tipo de composición florística diferente, determinado por la abundancia de dos especies claves (*Festuca humilior* y *Brachypodium mexicanum*), la biomasa aérea disponible y la profundidad del suelo. Se determinó que cada tipo de pastizal tiene una respuesta diferente ante la temporada de lluvias. El pajonal de *Festuca* es el que depende menos de la estación lluviosa, mostrando pocas diferencias en la cobertura de vegetación y abundancia de especies anuales. En cambio, el pajonal mixto y el césped de puna muestran un incremento en la cobertura de vegetación, asociado a la presencia de especies anuales. Esta información muestra la importancia de tomar en cuenta los tipos de pastizales y su producción de biomasa para dar mejores recomendaciones en la búsqueda de un manejo ganadero sostenible.

Palabras Clave: Pastizales andinos, Cordillera Blanca, tipos de pastizal, deseabilidad de pastos, condición de pastos, manejo de pastizales

Abstract

Overgrazing is recognized as one of the main threats to the ecological integrity of the puna rangelands. However, there is little we know about the ecological processes that maintain biomass production and the floristic composition of the different types of rangeland existing in the Andes, which is the basis for giving a good recommendation for livestock management. Therefore, this work seeks to characterize the types of rangeland present in the study area and to evaluate the response that the vegetation has, in each type of rangeland, during the rainy season. The study area is a puna rangeland located at 4000 masl, in the rural community of Canray Grande (Cordillera Blanca, Ancash, Peru). For the characterization, the dominant plant communities were identified and fixed transects were established, which were evaluated quarterly for nine months. In addition, samples of soil were taken to measure the bulk density and available aerial biomass. The results show three types of pasture: *Festuca* grassland, mixed grassland and puna grassland, each with a different type of floristic composition, determined by the abundance of two key species (*Festuca humilior* and *Brachypodium mexicanum*), the aerial biomass available and the depth of the soil. It was determined that each type of rangeland has a different response to the rainy season. The *Festuca* grassland is the one that depends least on the rainy season, showing few differences in vegetation coverage and abundance of annual species. On the other hand, mixed grassland and puna grassland show an increase in vegetation cover, associated with the presence of annual species. This information shows the importance of taking into account the types of rangelands and their production of biomass to give better recommendations in the search for sustainable livestock management.

Keywords: *Andean rangelands, Cordillera Blanca, types of rangeland, desirability of pasturage, condition of pasture, rangeland management*

Introducción

Los pastizales de puna, también llamados pradera o pajonal andino, son ecosistemas de zonas áridas y semiáridas dominados por vegetación herbácea de las familias Poaceae y Asteraceae, que están adaptadas a condiciones climáticas extremas (Flórez y Malpartida, 1987; Flórez, 2005; Genin y Alzerraca, 2006). Estos pastizales se desarrollan en la región denominada “puna”, que se encuentra entre 8° y 23° de latitud sur, en América del Sur, y entre los 3800 y 4800 msnm.

En las partes más altas de la puna, la temperatura promedio anual es de 4 a 5 °C, y en las partes inferiores las heladas son frecuentes, cuando el cielo está despejado (Genin y Alzerraca, 2006). De norte a sur, la precipitación promedio anual va disminuyendo, y los meses de estiaje aumentando. El rango de precipitación anual en la puna puede variar de 1200 mm (en las áreas más húmedas) y 150 mm (en las partes más secas) (Wilcox et al., 1987). En el Perú, los pastizales de puna se encuentran a más de 3800 msnm y abarcan más de 18 millones de hectáreas, lo que representa el 14.2% de la superficie nacional (MINAM, 2015).

Los pastizales de puna son ecosistemas dominantes en las cabeceras de cuenca y cumplen un rol ecológico muy importante al permitir la recarga de agua superficial y subterránea, evitar la erosión del suelo y servir como refugio de fauna silvestre (Tapia, 1984a; Zarría, 2015). Además, albergan una gran diversidad de fauna y flora silvestre. Por ejemplo, Gómez y Sarmiento (2015) destacan la amplia diversidad de fauna encontrada en la Cordillera Real en Bolivia, incluyendo numerosos insectos terrestres y acuáticos, así como reptiles y anfibios. Se encuentran aves residentes y migratorias, la mayoría de ellas insectívoras, como los canasteros (*Asthenes humilis*), aves granívoras, como las perdices (*Nothoprocta ornata*) y los jilgueros (*Sporagra atrata*), aves acuáticas como la huallata (*Oressochen melanopterus*), y aves rapaces, como los halcones (de los géneros *Falco* y *Phalcoboenus*), y el emblemático cóndor andino (*Vultur gryphus*). En cuanto a los mamíferos, se encuentran diversos roedores y la vizcacha (*Lagidium viscacia*), herbívoros como la taruca (*Hippocamelus antisensis*) y vicuña (*Vicugna*

vicugna), y carnívoros, como el zorro andino (*Lycalopex culpaeus*) y el puma (*Puma concolor*).

Por otro lado, la composición vegetal muestra gran variación a lo largo del paisaje andino. Se esperan diferencias en los tipos de pastizal que se desarrollan, de acuerdo con la pendiente, la exposición, las características edáficas (textura, contenido de materia orgánica, humedad, pH) y el tipo de suelo (Tapia, 1984a; Flórez y Malpartida, 1987; Adler y Morales, 1999; Catorci et al., 2014). Por ello, se han propuesto diversas clasificaciones para los tipos de pastizales que existen en la puna. En el caso peruano, la mayoría de ellas considera la forma de crecimiento dominante como el principal criterio para diferenciar tipos de pastizal. Sin embargo, se encuentra que estos tipos de pastizal a menudo se presentan a la vez en un paisaje, generando gradientes o áreas mixtas, en que se combinan dos tipos de pastizal.

Pajonales: Es el tipo de pastizal dominante, con mayor extensión en la puna. Se caracteriza porque dominan gramíneas de hojas duras y de porte alto, de hasta 80 cm de altura, que forman densas agrupaciones. Las plantas características son de los géneros *Festuca*, *Stipa*, *Calamagrostis* (Flórez y Malpartida, 1987; Genin y Alzerraca, 2006; MINAM, 2015).

Algunos autores diferencian, a su vez, subtipos de pajonales, tomando en cuenta la especie de gramínea dominante, que se puede usar como indicadora de las condiciones del suelo. Los tres tipos más mencionados son: a) Pajonal de *Festuca orthophylla*, que se desarrolla sobre suelos arenosos, pobres, con amplias zonas desnudas, y con bajo potencial forrajero. 2) Pajonal de *Stipa ichu* (ahora llamada *Jarava ichu*), común bajo condiciones xerófitas, en las zonas de laderas, con suelos delgados y pH ácido, y de bajo potencial forrajero. 3) Pajonal de *Festuca dolichophylla*, ubicado en zonas planas, con suelos más húmedos y profundos, con alto potencial forrajero (Tapia, 1984b; Genin y Alzerraca, 2006).

Césped de Puna: Son pastizales dominados por hierbas de porte bajo, almohadillado y arrositado, de hasta 15 cm de altura, generalmente gramíneas (Poaceae) y gramínoideas (Cyperaceae y Juncaceae), (Flórez y Malpartida, 1987; MINAM, 2015). Cubre grandes extensiones y presenta gran riqueza y variabilidad en su composición vegetal. Su potencial forrajero dependerá, en gran medida, del porcentaje

del suelo cubierto por vegetación, y del tipo de ganado que se pastoree (Tapia, 1984b). Sólo hemos encontrado la descripción de un subtipo de césped de puna, el dominado por *Calamagrostis vicunarum*, que crece en áreas planas, pero con suelos delgados, y generalmente con mal drenaje (Tapia, 1984b).

Tolares: Zonas con presencia de arbustos, de hasta 120 cm de altura, mucho más frecuentes en la sierra sur del Perú (MINAM, 2015). Dominan los arbustos conocidos comúnmente como “tola” (especies de los géneros *Parastrephia* y *Baccharis*) de baja deseabilidad para el ganado (Flórez y Malpartida, 1987).

En esta revisión, se ha dejado fuera las referencias sobre zonas más húmedas, como los bofedales y gramadales, porque están considerados como tipos de humedales altoandinos.

Los ecosistemas de pastizal que se observan, además de las condiciones biofísicas, son resultado de profundas transformaciones e intervenciones antrópicas (Herrera et al., 2006). Estos han tenido un uso pastoril milenario, y las sociedades andinas han desarrollado prácticas y estrategias ganaderas para aprovechar estos recursos naturales. Inicialmente criaron especies nativas domesticadas (llamas y alpacas), y luego las asociaron con especies exóticas (ovejas y vacas), introducidas desde la época de la colonia (Genin y Alzerraca, 2006). En la actualidad, numerosas familias y comunidades campesinas siguen dependiendo del acceso a pastizales, que es la principal fuente de la alimentación del ganado (Genin y Alzerraca, 2006; Flores, 2017). Esto especialmente en áreas ubicadas a más de 4000 msnm, donde es muy difícil mantener cultivos agrícolas, debido a las frecuentes heladas y bajas temperaturas (Tapia, 1984a; Jamtgaard, 1989; Farfán y Farfán, 2012).

Según Zarria (2015), más del 40% de las áreas de pastoreo en el Perú están en condición pobre y/o en proceso de deterioro, debido al sobrepastoreo y al mal manejo, y esto incluye a los pastizales de puna. El sobrepastoreo ocurre cuando la cantidad de unidades de ganado por hectárea supera la capacidad de producción del pastizal, generando la pérdida de cobertura vegetal y del nivel de productividad, favoreciendo la erosión del suelo (Adler y Morales, 1999; Ance, 2003).

El efecto más evidente del pastoreo en el pastizal es que genera cambios en la composición de la

vegetación, de acuerdo con la deseabilidad de las especies, y según la intensidad del pastoreo. Cuando el pastoreo es de baja intensidad, no se detectan cambios en la vegetación (Carilla, Aragón y Gurvich, 2011), mientras que, cuando hay sobrepastoreo, las especies más deseables disminuyen y las especies de deseabilidad media aumentan, reemplazando a las más deseables (Flórez, 2005). Cuando el sobrepastoreo es crónico, o de alta intensidad, disminuyen las especies de deseabilidad alta y media, y las especies indeseables, a veces tóxicas para el ganado o muy pequeñas para ser consumidas, son las que aumentan su abundancia (Wilcox et al., 1987; Adler y Morales, 1999; Catorci et al., 2014).

En la búsqueda de alternativas que permitan hacer un manejo del ganado social, económica y ecológicamente sostenible, favoreciendo la recuperación del ecosistema, es importante evaluar otros factores, además de la intensidad de pastoreo. El tipo de ganado, el tipo de pastizal y el gradiente de precipitación son factores que también influyen en la respuesta del pastizal al pastoreo, pero que pocas veces se toman en cuenta en las investigaciones (Adler y Morales, 1999; Genin y Alzerraca, 2006; Carilla, Aragón y Gurvich, 2011).

La precipitación anual y la estacionalidad climática, por ejemplo, se han convertido en factores imprescindibles para entender procesos de cambio ecológico y de manejo de los pastizales de puna. Sabemos que los meses más lluviosos (diciembre a marzo), coinciden con el periodo de crecimiento de las plantas, de aumento de la cobertura vegetal y de forraje disponible para el ganado, con la aparición de diversas especies anuales (Genin y Alzerraca, 2006; Farfán y Farfán, 2012). Lo contrario ocurre durante los meses de estiaje (abril a noviembre), en que los pastizales son dominados por especies gramíneas perennes, algunas de ellas deseables sólo durante la temporada de crecimiento, por lo que hay escasez de forraje para el ganado (Adler y Morales, 1999; Flórez, 2005; Farfán y Farfán, 2012). Pero es poco lo que se conoce sobre los efectos que esto genera en los diferentes tipos de pastizal.

En este caso, aprovechamos la información recogida durante el monitoreo de un pastizal de puna para responder las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los tipos de pastizal dominantes en el área?, ¿Cuáles son los cambios que la temporada de lluvias genera en diferentes tipos de pastizal?, ¿Los cambios

identificados se relacionan con la presencia de especies anuales?, ¿Qué implicancias tienen nuestros resultados para mejorar el manejo de los pastizales de puna?

Metodología

Área de Estudio

La presente evaluación se llevó a cabo en el sector Rurek de la comunidad campesina “Canray Grande”, ubicada en la Cordillera Blanca, provincia de Huaraz, región Ancash, entre 3900 y 4100 msnm. Ecológicamente, pertenece a la puna, pero es una zona transicional entre el ecosistema de páramo y la puna seca (Herrera et al., 2006). La precipitación anual está entre 1200 y 1400 mm/año (Oscanoa, 2016). Rurek abarca 731 ha, atravesadas por el río Rurek, y se divide en tres parajes, de norte a sur: Puiripu, Ashojpampa y Putaca (Figura 1). La evaluación se realizó en la parte plana del paraje de Puiripu (50 ha), que actualmente es usada solo por el ganado de la comunidad, conformado por 55 cabezas de ganado vacuno.

Áreas de Evaluación

En noviembre de 2017, por iniciativa de la comunidad y con apoyo del Instituto de Montaña, se

construyeron tres cercos para separar los potreros P1 y P2 (Figura 2) del resto del área de Rurek con el objetivo de hacer un pastoreo rotativo más controlado. Antes de construir el cercado, los 55 vacunos de la comunidad pastoreaban la quebrada Rurek bajo el control del pastor, que las hacía rotar dos veces al año. Esto implicaba que el área de Puiripu descansaba cinco a seis meses al año. En noviembre, la comunidad terminó de construir el cercado, y entre octubre de 2017 y junio de 2018, el área de estudio estuvo en descanso. En julio y agosto sólo P2 fue usado con una carga animal estimada de 0.36 UA/ha/año.

Inicialmente, se realizó una visita al área de estudio para diferenciar los tipos de pastizal presentes, y elaborar un mapa (Figura 2). Durante la visita se observó una gradiente natural de humedad en dirección de NE a SO. En el área se distinguieron tres tipos de pastizal dominantes: pajonal de *Festuca*, césped de puna y un tipo mixto en que se entremezcla el pajonal con el césped de puna. Además, se encontraron áreas más pequeñas con presencia de pajonal de *Jarava ichu*, y otras con “kikuyo” (*Pennisetum clandestinum*), que es un pasto introducido (Figura 2). En toda la zona de estudio, se eligieron nueve áreas de evaluación. Esto incluye dos áreas dentro de dos parcelas de 25 x 50 m, cercadas, que serán usadas a mediano plazo para evaluar los cambios en el pastizal, sin presencia de ganado.

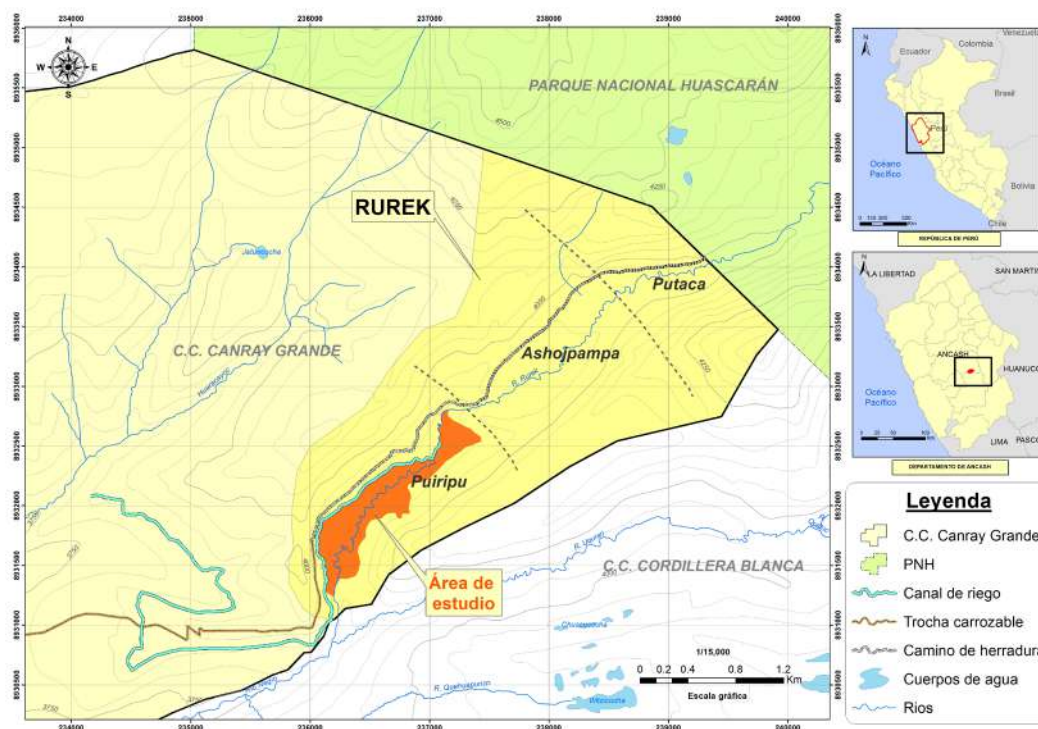


Figura 1. Ubicación del área de estudio en Rurek, Provincia de Recuay.

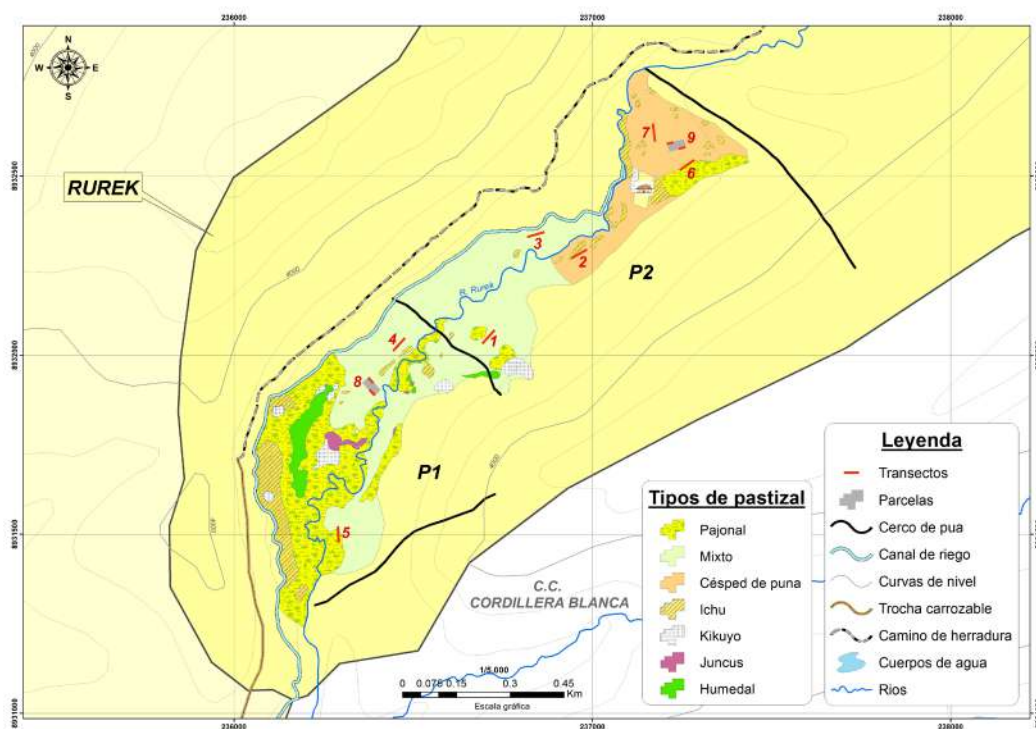


Figura 2. Tipos de pastizal y diseño del muestreo en Rurek.

Evaluación de Parámetros

Composición florística: En cada área de evaluación se establecieron transectos fijos de 50 m, marcándolos con tres estacas de madera, y se evaluaron trimestralmente. Al interior de las parcelas cercadas, se establecieron dos transectos fijos de 20 m cada uno (8 y 9 en Figura 2). Se realizaron cuatro evaluaciones: fines de octubre de 2017 (final de la época seca), inicios de febrero del 2018 (durante la época de lluvia), inicios de mayo del 2018 (fines de la época de lluvia), e inicios de agosto del 2018 (durante la época seca).

Para evaluar la composición de especies, se utilizó el método de evaluación al paso de Parker, tomando 100 puntos equidistantes en el transecto, y un anillo censador (Flórez y Malpartida, 1987). En cada punto se identifica y registra la especie vegetal que se encuentra, y si no, el tipo de cobertura que hay, sea mantillo, suelo desnudo, roca o agua. Además, al iniciar la evaluación del transecto, se elige una especie vegetal deseable para el ganado vacuno, registrando diez medidas de la altura de la especie elegida.

Características del suelo: En noviembre de 2017, se recogieron muestras de suelo, excepto en las parcelas cercadas, para ser analizadas en laboratorio. Estas muestras fueron puestas en bolsas herméticas, marcadas con el código del transecto y enviadas al

Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego, de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina en Lima.

Se hicieron también dos muestreos, usando el método del cilindro, para estimar la humedad y densidad aparente, en noviembre de 2017 y agosto de 2018. Cada muestra fue puesta en una bolsa marcada y pesada en fresco, y luego llevada a la estufa durante 48 horas a 80 °C, para determinar el peso seco. Finalmente, en agosto de 2018 se estimó la profundidad del suelo útil para las raíces de plantas. Usando un penetrómetro, se hunde la punta hasta que llega al rango límite, y se mide la profundidad máxima a la que llegó. En cada área de evaluación se tomaron 10 valores paralelos al transecto de vegetación.

Biomasa aérea: En noviembre de 2017, se hizo la primera colecta de biomasa aérea. Para ello se usó un cuadrante de 50 x 50 cm, ubicado a la mitad del transecto, y en una zona representativa. En febrero, se tomó una segunda muestra de biomasa por transecto, pero ahora con un cuadrante de 30 x 30 cm, ubicado en los 12.5 m del transecto. Al interior de cada cuadrante, se cortó toda la vegetación simulando el corte del ganado vacuno, a 3 cm del suelo. Las muestras colectadas fueron colocadas en bolsas de papel, marcadas con el código del transecto y cuadrante usado, y fueron secadas en la estufa durante 48 horas, a 80 °C.

Estimación de los Indicadores

Composición florística: Para cada transecto, y cada evaluación, se estima la abundancia por especie registrada, y la abundancia por tipo de cobertura del suelo (vegetación, mantillo, roca y suelo desnudo), por transecto y tipo de vegetación en cada evaluación. A partir de estas listas también se tiene el número de especies por transecto y tipo de vegetación, además de las especies más frecuentes por transecto y tipo de vegetación. En el Anexo 1 se muestra la lista completa de especies registradas.

Con la información por transecto se estimó la condición del pastizal siguiendo la metodología propuesta por Flórez y Malpartida (1987). Esto requiere clasificar cada especie de acuerdo con el nivel de deseabilidad para el ganado vacuno. Para ello, usamos la información aportada por el Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, durante una consultoría realizada para el proyecto en el año 2016. Para algunas especies de las que no se tuvo esta información, se usó lo reportado por Salvador (2002) y por los pastores locales.

La estimación del puntaje para establecer la condición es:

$$\text{Puntaje de la condición} = 0.5 (\%D) + 0.2 (\%IF) + 0.2 (\%IS) + 0.1 (\%IV)$$

Donde:

$$\% D (\text{Deseables}) = \% \text{ Especies deseables}$$

$$\% IF (\text{Índice Forrajero}) = \% D + \% \text{ Especies poco deseables}$$

$$\% IS (\text{Índice de suelo}) = \% \text{ Vegetación (incluyendo musgos y líquenes)} + \% \text{ Mantillo}$$

$$\% IV (\text{Índice de Vigor}) = \text{promedio de la altura de la especie indicadora} / \text{altura máxima de la especie indicadora} * 100$$

La altura máxima es un valor definido, en nuestro caso usamos 100 cm para *Festuca humilior*, y 30 cm para *Calamagrostis vicunarum* (LEUP, comunicación personal).

El puntaje fue calculado para cada transecto y tipo de vegetación, para cada evaluación, y sirve para determinar la condición y capacidad de carga, a partir de la Tabla 1.

Tabla 1. Capacidad de carga según condición del pastizal.

Condición del Pastizal	Puntaje	Carga Vacunos (UA/ha/año)
Excelente	81 a 100	1.00
Bueno	61 a 80	0.75
Regular	41 a 60	0.50
Pobre	21 a 40	0.13
Muy Pobre	1 a 20	0.07

Carga = Capacidad de Carga, UA= Unidad Animal

Asimismo, hemos clasificado cada especie en perenne (cuando su ciclo de vida es mayor a un año) y anual (cuando su ciclo de vida se cumple en un año o menos), y se ha estimado la abundancia y número de especies anuales y perennes por transecto y tipo de pastizal, para cada evaluación.

Características edáficas: De las muestras analizadas en laboratorio, se midió el pH, materia orgánica (en %), K y P (en ppm) y CIC (en meq/100 g), por transecto. Asimismo, de las muestras llevadas a la estufa, se tuvo dos valores de densidad aparente y dos de humedad por transecto. Finalmente, se sacó un promedio de profundidad de suelo por transecto. Estos datos fueron usados para identificar características edáficas que diferencian tipos de pastizal.

Para estimar la humedad del suelo (% de agua) y la densidad aparente se usaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Densidad aparente (Da)} = \text{peso seco (g)} / \text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}$$

$$\% \text{ Agua} = \text{peso fresco} - \text{peso seco} / \text{peso fresco} * 100$$

Biomasa aérea: Para cada transecto y tipo de pastizal se obtuvo la biomasa aérea seca total, usando el promedio de peso seco de las muestras, y proyectando el área para obtener kgMS/ha.

Análisis de los Datos

Para caracterizar cada tipo de pastizal, se identificaron las especies más abundantes por

transecto, promediando los valores de cada evaluación, y los valores de biomasa aérea. Una vez clasificado cada transecto según el tipo de pastizal, se han hecho comparaciones usando Análisis de Varianza y pruebas post-hoc, tomando como factor al tipo de pastizal para hacer comparaciones con todas las variables edáficas evaluadas: pH, MO, P, K, CIC, además de la densidad aparente, humedad del suelo (según fecha de evaluación) y profundidad de suelo. También, se ha incluido la condición de cada tipo de pastizal.

Para describir el efecto que genera la época de lluvias en los diferentes tipos de pastizal, se obtuvo el promedio de cada cobertura del suelo (vegetación incluyendo musgos y líquenes, mantillo, y la suma de suelo desnudo y roca), según tipo de pastizal y fecha de evaluación. De manera similar, se obtuvo la cobertura de especies anuales, y el número de especies anuales y perennes por transecto.

Resultados

En todo el pastizal de puna evaluado, se encontraron 51 especies de plantas, pertenecientes a 18 familias. La familia Poaceae fue la más diversa, con 16 especies, seguida por la familia Asteraceae, con 7 especies (Anexo 1). Para cada una de las áreas de evaluación, se han identificado las especies más abundantes en promedio en el año de evaluación, y con base en esto y los valores de biomasa aérea se les ha definido como un tipo de pastizal (Tabla 2).

En el área de evaluación, encontramos dos especies que son dominantes, *Festuca humilior* en las áreas que hemos clasificado como pajonal, y *Brachypodium mexicanum* en las áreas que hemos clasificado como césped de puna, excepto en una de las parcelas cercadas (CG08.1, Tabla 2), en la que domina *Calamagrostis vicunarum*. Con base en la abundancia de estas especies, hemos reclasificado cada una de las áreas de evaluación, como pajonal de *Festuca*, cuando esta especie alcanza valores mayores al 50% de abundancia, y como pajonal mixto cuando su abundancia está alrededor del 20%, con presencia de otras especies de porte bajo como *C. vicunarum*, y las especies del género *Lachemilla*. En el caso de CG04, se decidió clasificarlo como pajonal mixto por los valores de biomasa encontrados, más cercanos al pajonal mixto que al de *Festuca*. Las demás áreas de evaluación se han clasificado como césped de puna, ya que la especie dominante es de porte bajo, y se han diferenciado, cuando hay alguna especie de pajonal acompañante, como *Jarava ichu* o *F. humilior*.

Observamos que la biomasa se relaciona con la presencia de *F. humilior*, con valores mayores en el pajonal de *Festuca*, valores intermedios en las zonas de pajonal mixto, y los valores más bajos cuando son áreas de césped de puna ($F=22.76$, $p<0.05$) (Tabla 2). Asimismo, encontramos que la profundidad de suelo es un factor relacionado con la presencia de *Festuca*, encontrando una relación positiva y significativa entre la profundidad del suelo y la abundancia de *F. humilior* ($R^2=71.1\%$, $p>0.001$).

Tabla 2. Clasificación por tipo de pastizal de cada área de evaluación.

Área de Evaluación	Especie Más Abundante	Otras Especies Abundantes	Biomasa (kgMS/ha)	Profundidad Suelo (cm)	Tipo de Pastizal
CG05	Fehu (54)	Laor (7), Caec(6)	5305.4	40.0	Pajonal de <i>Festuca</i>
CG06	Fehu(52)	Caec (9)	4360.3	34.0	Pajonal de <i>Festuca</i>
CG04	Fehu(38)	Lapi (11), Cavi (6)	1979.9	37.0	Pajonal mixto
CG03	Fehu(26)	Cavi(9), Lapi (6)	1852.1	17.0	Pajonal mixto
CG01	Fehu (24)	Caec(8), Cavi (7)	1871.5	33.0	Pajonal mixto
CG08.2	Fehu (22)	Laor (11), Cavi (10), Brame (9)	3916.7	33.0	Pajonal mixto
CG08.1	Cavi (20)	Fehu (10), Brame (9)	1024.6	18.0	Césped de puna con <i>Festuca</i>
CG02	Brame (13)	Jaic(7), Muvo (7)	492.5	12.3	Césped de puna con ichu
CG09.1	Brame (28)	Cavi(8), Wenu(6)	1113.2	17.0	Césped de puna
CG09.2	Brame (24)	Cavi (7), Wenu (6)	894.7	14.0	Césped de puna
CG07	Brame (22)	Cavi(14), Caec(14)	1241.3	17.0	Césped de puna

Entre paréntesis se muestra la abundancia en porcentaje de cada especie. **Fehu** = *Festuca humilior*, **Brame** = *Brachypodium mexicanum*, **Cavi** = *Calamagrostis vicunarum*, **Laor** = *Lachemilla orbiculata*, **Caec** = *Carex ecuadorica*, **Lapi** = *Lachemilla pinnata*, **Jaic** = *Jarava ichu*, **Muvo** = *Muehlenbeckia volcanica*, **Wenu** = *Werneria nubigena*.

Características por Tipo de Pastizal

Como se ha dicho, hay sitios de pajonal ampliamente dominados por *Festuca humilior* que están acompañados por las especies *Carex ecuadorica* y *Lachemilla orbiculata* (Tabla 2). Estas dos últimas son conocidas por crecer en ambientes con mayor humedad en el suelo, mientras que en el pajonal mixto, además de *Carex ecuadorica*, encontramos *Calamagrostis vicunarum*, *Lachemilla pinnata*, y *Brachypodium mexicanum*, acompañando a *F. humilior*. En las zonas de césped de puna, además de *B. mexicanum*, encontramos principalmente a *C. vicunarum* y *Werneria nubigena*, excepto en la zona de césped de puna, con presencia de *J. ichu*, que presenta, además, *Muehlenbeckia volcánica*, especies acompañantes diferentes a las demás zonas evaluadas.

Los suelos analizados en el laboratorio mostraron una textura franco-arenosa, pH ácidos, con muy baja salinidad y valores altos de materia orgánica (>7%) y baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Se han encontrado algunas diferencias en las características edáficas según el tipo de pastizal (Tabla 3). La profundidad de suelo fue mayor en los sitios de pajonal de *Festuca* y mixto, en comparación con los sitios de césped de puna ($F=19.9$, $p<0.05$). Además, el pajonal tuvo menos concentración de P en el suelo ($F=12.96$, $p<0.05$) y más humedad en el mes de noviembre 2017 ($F=7.48$, $p<0.05$) que en zonas de césped de puna.

La densidad aparente parece ser menor en las zonas de pajonal de *Festuca*, y mayor en los sitios de césped de puna (Tabla 3), sin embargo, estos valores no muestran diferencias significativas. Los valores entre 0.9 y 1.1 g/m³ se consideran normales para texturas francas. Por último, encontramos que la condición del pastizal se relaciona con la presencia de *F. humilior*, siendo buena en los sitios de mayor

abundancia de esta especie, regular en los sitios con presencia media de *F. humilior*, y pobre en los sitios de césped de puna (Tabla 3).

Efecto de la Estacionalidad en el Tipo de Pastizal

El efecto de la temporada de lluvias difiere según el tipo de pastizal (Figura 3). Encontramos que el pajonal de *Festuca* es el que muestra menor variación en la cobertura del suelo a lo largo del año. En general, el suelo tiene una alta cobertura de vegetación y muy baja de piedras o suelo desnudo. Los valores de mantillo se reducen un poco hacia el final de lluvias, mientras aumenta ligeramente el de vegetación (Figura 3a). En cambio, el pajonal mixto sí muestra cambios en la cobertura. Durante la época de lluvias, aumenta en un 20% la cobertura de vegetación, reduciendo tanto la cobertura de mantillo, como de suelo desnudo y piedras (Figura 3b). El césped de puna es el tipo de pajonal con mayor grado de respuesta a la época de lluvias, llegando a duplicar la cobertura de vegetación, y reduciendo en la misma medida la cobertura de mantillo, de suelo desnudo y piedras (Figura 3c).

Los cambios observados en la cobertura de vegetación se deben principalmente al desarrollo de especies anuales (Figura 4). Esto se puede confirmar al revisar que la abundancia de especies anuales en los pajonales de *Festuca* durante la época de lluvias es mucho menor a la abundancia que alcanza en las áreas de pajonal mixto y césped de puna (hasta 25% de abundancia en el transecto al finalizar las lluvias). Algo similar ocurre en el número de especies por transecto. El número de especies aumenta en las áreas de pajonal mixto y césped de puna, mientras que en los pajonales de *Festuca* se mantiene más constante (Figura 4). Este efecto de la época de lluvias se encuentra también de manera general en el área de estudio: se registraron 25 especies en noviembre de

Tabla 3. Características edáficas, según tipo de pastizal.

Tipo de Pastizal	pH	MO (%)	P (ppm)	K (ppm)	CIC total (meq/100g)	Da (g/cm ³)	Humedad Suelo (%)		Condición del Pastizal
							Lluvia	Seca	
Pajonal	5.1	12.6	5.12	240.8	5.61	0.90	22.90	28.10	69.4 (Bueno)
Pajonal mixto	5.1	7.7	4.42	108.9	5.55	0.98	29.63	21.80	51.8 (Regular)
Césped de puna	4.9	9.1	7.80	141.6	4.33	1.01	15.30	22.75	36.1 (Pobre)

MO = Materia orgánica, y Da = Densidad aparente. Muestras tomadas: (1) noviembre 2017, y (2) agosto 2018.

2017, 39 en febrero y mayo de 2018, y 34 en agosto de 2018.

En el caso del césped de puna, se encuentra que, además, durante el periodo de lluvias hay un incremento en la cobertura de especies perennes (Figura 4). Al revisar los datos, este efecto se relaciona a especies como *Calamagrostis vicunarum*, que reduce su cobertura viva durante la época de estiaje y se desarrolla durante la época de lluvias, lo que puede incrementar su valor de abundancia en el transecto.

Finalmente, se ha encontrado que son algunas especies las que generan los principales cambios en la cobertura vegetal en cada tipo de pastizal. En el caso del pajonal de *Festuca* se ha visto un aumento de *Juncus ebracteatus*, una especie asociada a humedales, que aumenta su abundancia durante la época de lluvias, y a *Paranephelium bullatus*, una especie anual. En el caso del pajonal mixto, los cambios se asocian a tres especies, *P. bullatus* e *Hypsela reniformis*, ambas anuales y con la presencia de *Ranunculus flagelliformis*, una especie perenne en cuerpos de agua, pero que aquí presenta un

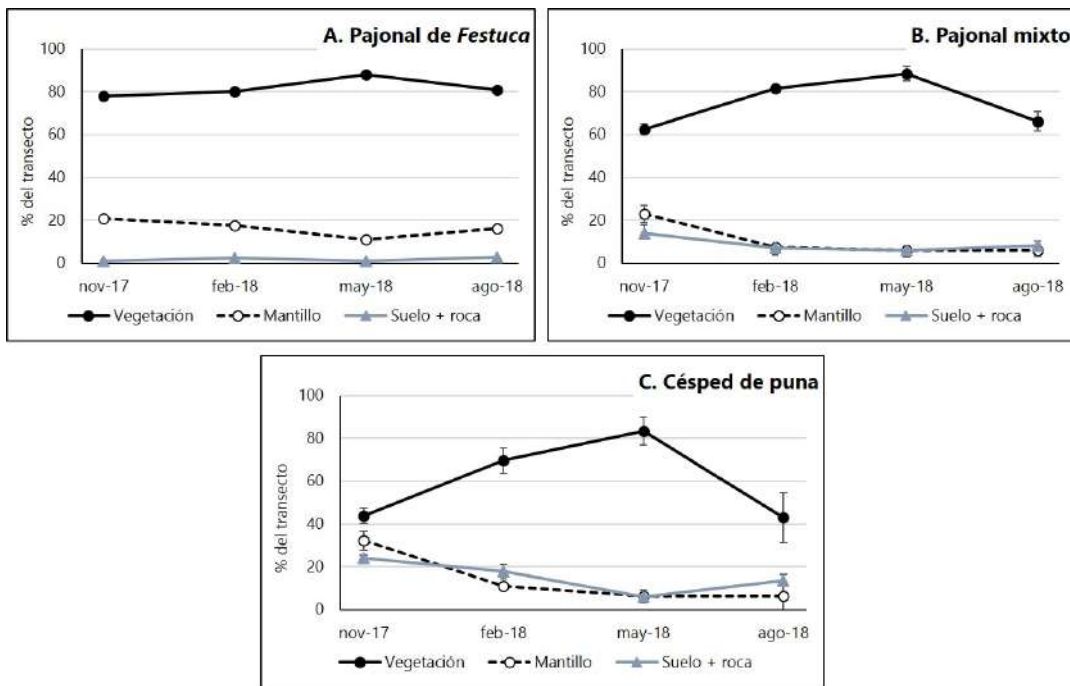


Figura 3. Cambios estacionales en las coberturas del suelo, según tipo de pastizal.

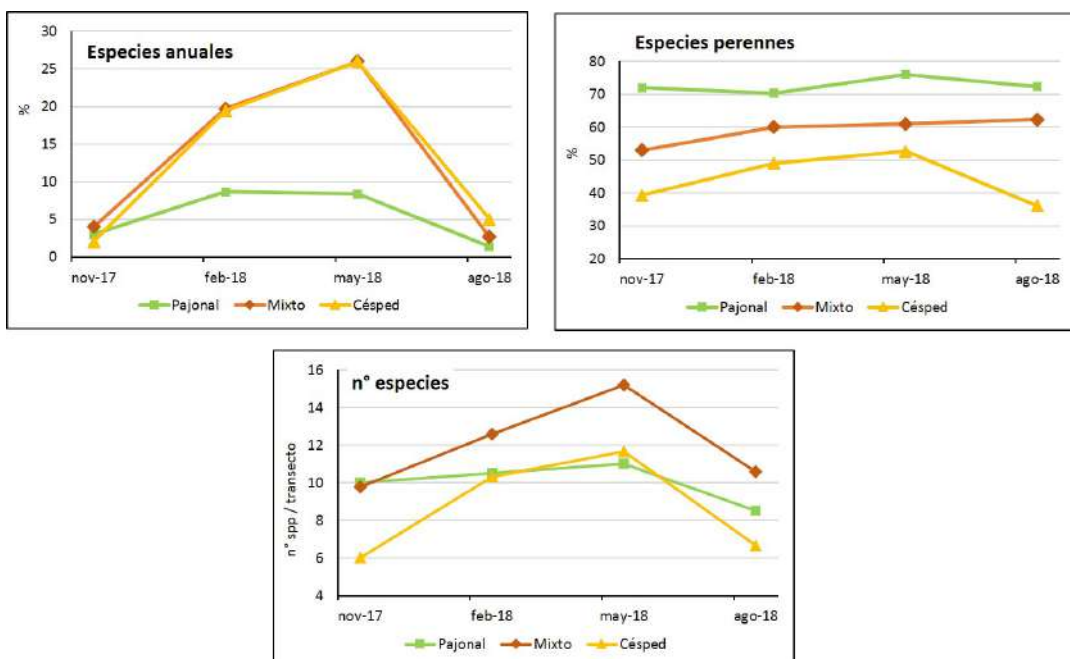


Figura 4. Cambios en la vegetación, según tipo de pastizal.

comportamiento anual, apareciendo sólo durante la época de más lluvia.

En el césped de puna también se encuentra *R. flagelliformis* e *H. reniformis*, así como algunas gramíneas anuales como *Dissanthelium* spp., *Muhlenbergia peruviana* y *Nassella brachyphylla*, esta última creciendo principalmente en el área de césped de puna con ichu.

Discusión

Esta evaluación en un pastizal de puna busca reforzar algunas ideas que deberían ser tomadas en cuenta al generar recomendaciones para el manejo ganadero de los pastizales de puna. Nuestra área de estudio es un área relativamente homogénea, topográficamente se enfocó en las partes más planas, y las condiciones de suelo no muestran gran variación. En estas condiciones, se ha encontrado una gradiente de tipos de pastizal que va desde áreas en que domina el pajonal de *Festuca humilior*, hasta áreas de césped de puna dominadas por *Brachypodium mexicanum*. Este gradiente genera problemas al tratar de diferentes tipos de pastizal, y por ello hemos tenido que generar una clasificación intermedia, la de pajonal mixto, que abarca la mayor parte del área de estudio.

Se ha encontrado que *F. humilior* se relaciona con la presencia de suelos más profundos y más húmedos. Algo similar se ha reportado para sitios de pajonal de *F. dolichophylla*, que se encuentran en hondonadas con suelos méxicos, con una buena condición forrajera, y valores altos de producción de biomasa (Tapia, 1984b; Genin y Alzerraca, 2006). Esto podría indicar que cumple una función ecológica similar, la cual habría que analizar con más detalle. Además, se está trabajando en la factibilidad de sembrarla, a través de esquejes, para mejorar la condición de pastizales de puna degradados (Tacuna et al. 2015).

En el caso del césped de puna, hemos encontrado que presenta suelos más delgados, lo que se confirma con la presencia de especies como *Calamagrostis vicunarum*, y *Jarava ichu*. La primera es una especie que tiende a desarrollarse en suelos pobres, resiste bien la sequía y las heladas, y como otras gramíneas, su valor forrajero se va perdiendo a medida que la planta madura (Tapia, 1984c). Esta especie, al igual que *Jarava ichu* (antes *Stipa ichu*) crece en suelos delgados y/o empobrecidos (Tapia, 1984b). Algunos autores consideran que *J. ichu* es una especie

invasora de comunidades vegetales alteradas (Genin y Alzerraca, 2006). No se han encontrado referencias previas sobre las condiciones de crecimiento de la especie dominante en el césped de puna, *Brachypodium mexicanum*.

En cuanto a la producción de biomasa aérea, los valores encontrados en Rurek son altos en comparación con lo reportado por Genin y Alzerraca (2006). El pajonal de *F. dolichophylla* descrito tiene entre 550 y 2200 kgMS/ha, mientras que en este estudio el pajonal tuvo más del doble (4833 kgMS/ha). Para área con presencia de *C. vicunarum* se encuentran entre 220 y 300 kgMS/ha, mientras que en Rurek se tuvo más de 1000 kgMS/ha. La zona con presencia de ichu (*Jarava ichu*), con 492 kgMS/ha de biomasa aérea, es la única que se encuentra en el rango estimado por Genin y Alzerraca (2006) para este tipo de pastizal (100 a 500 kgMS/ha). Los valores en Rurek son altos, incluso si los comparamos con regiones cercanas, como lo reportado por Yalli (2017), 1375 kgMS/ha en un pastizal de condición regular, y 964 kgMS/ha en un pastizal pobre. Esto nos indica que debemos entender mejor cuáles son los factores que incrementan o reducen la producción de biomasa, además de la precipitación, en cada tipo de pastizal.

La cantidad de biomasa disponible es una de las variables más importantes a considerar para determinar la capacidad de carga de un pastizal y, por ello, del manejo del ganado (Flórez y Malpartida, 1987; Farfán y Farfán, 2012). Se sabe, además, que la biomasa dependerá de la humedad y del agua disponible (Tapia, 1984c; Flórez, 2005). Sin embargo, son escasos los trabajos que buscan relacionar las diferencias en la capacidad de producción de biomasa con el tipo de pastizal, y/o con el clima dominante en el área.

En este sentido, esta evaluación nos ha permitido reconocer las diferencias en la respuesta que cada tipo de pastizal tuvo a la época de lluvias. El pajonal de *Festuca* mantiene valores altos de cobertura vegetal, y abundancia de especies perennes durante todo el año. Esto puede relacionarse con el hecho de tener suelos más profundos, y mayores coberturas, lo que les permite mantener un microclima más húmedo durante la época seca. Pero esto debería ser corroborado con más detalle y mejores mediciones de humedad en el suelo.

En el pajonal mixto y césped de puna, hemos encontrado una mayor dependencia de la época de lluvias para incrementar la cobertura de vegetación, basada principalmente en el crecimiento de especies anuales. Aunque la diferencia principal es que durante la época seca el césped de puna presenta valores más bajos de cobertura de vegetación que el pajonal mixto, por lo que deben estar expuestos a procesos más fuertes de erosión del suelo. Se ha visto que durante la época de lluvias, principalmente en las áreas de césped de puna, las especies perennes también aumentan su cobertura. Esto indicaría que estas especies también dependen de la precipitación para su desarrollo, aunque estén bien adaptadas a las condiciones limitantes, con suelos delgados, y baja cobertura de vegetación.

Relacionar estas diferencias con la capacidad de producción de biomasa durante el año es el siguiente paso para poder dar mejores recomendaciones de manejo. Por ejemplo, se esperaría que el pajonal de *Festuca* tenga una producción de biomasa más estable a lo largo del año, por lo que podría mantener una carga animal estable, mientras que, en el caso del césped de puna, se recomendaría usarlo sólo una época del año, para que tenga tiempo de incrementar la cobertura vegetal.

Finalmente, quisiéramos destacar el rol que juegan las especies anuales en la recuperación del pastizal de puna, algo que ha sido pocas veces incorporado en planes de conservación, restauración y manejo de pastizales de puna. Existen algunas investigaciones que buscan recuperar la cobertura de especies perennes, a través de la siembra con esquejes, lo que implica mucho trabajo y mano de obra (Tacuna et al., 2015). En el caso de Rurek, hemos encontrado tres especies que son anuales y deseables para el ganado: *Bromus catharticus*, *Digitaria* spp. y *Paspalum pilgerianum*, que podrían ser fáciles de sembrar si naturalmente germinan en la zona. En este sentido, recuperar el conocimiento y las prácticas de los pastores es una tarea aún pendiente, ya que hemos observado que algunos de ellos mantienen los pastizales de puna, favoreciendo el establecimiento de pastos anuales.

Conclusiones

El sobrepastoreo se reconoce como una de las principales amenazas para la integridad ecológica de los pastizales de puna, sin embargo, es poco lo que

aún conocemos sobre los procesos ecológicos que mantienen la producción de biomasa y composición florística de los diferentes tipos de pastizal que existen en los Andes. Esta evaluación de un pastizal de puna nos ha permitido reflejar la importancia de reconocer los diferentes tipos de pastizal presentes, ya que se presentan y asocian con un gradiente ambiental. Las condiciones biofísicas que favorecen la presencia de ciertas especies en cada zona, a su vez, generan condiciones para que cada tipo de pastizal responda de manera diferente a factores ambientales, como en este caso la temporada de lluvias, pero probablemente también a factores antrópicos como el pastoreo de ganado. Consideramos que aún hay mucho por evaluar y entender del comportamiento del pastizal de puna, que nos permitirá dar mejores recomendaciones de manejo ganadero para el uso sostenible de estos importantes ecosistemas.

Agradecimientos

Esta investigación es parte del proyecto “Punas Agua III” liderado por el Instituto de Montaña y financiado por la Fundación McKnight. Queremos agradecer a los dos revisores que ayudaron a enriquecer este artículo, y a Bill Yalli por proporcionarnos la lista de especies de pastos y su deseabilidad, como parte de la consultoría realizada a nombre del Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastos (LEUP) de la Universidad Nacional Agraria La Molina. También agradecer a todos los que colaboraron en campo, en la colecta y organización de datos: Yanett Gonzáles, Teresa Oropeza, Yelina Granados, Edson Genebroso, Joshimar Bartolo, Clinton Huamán, Alonso Villanueva, Edwin Figueroa. A todos los miembros de la comunidad Canray Grande, en especial a aquellos que ayudaron con el diseño y ejecución de esta investigación: Clemente Trejo (presidente), Rolando Huerta (secretario), Tito Alva (comunero), Cipriano Alvarado (pastor), y Teodora Molina (pastora).

Referencias

- Adler, P. B. y Morales, J. M. (1999). Influence of environmental factors and sheep grazing on an Andean grassland. *Journal of Range Management*, 52(5), 471-481.
- Ance Villca, V. (2003). *Soportabilidad de praderas en serranía y planicie durante dos épocas en pastoreo de llamas (Lama glama) en el CEAC*. Tesis doctoral. Oruro, Bolivia, Universidad Técnica de Oruro.

- Carilla, J., Aragón, R. y Gurvich, D. E. (2011). Fire and grazing differentially affect aerial biomass and species composition in Andean grasslands. *Acta Oecologica*, 37(4), 337-345.
- Catorci, A., Velásquez, J. L., Cesaretti, S., Malatesta, L., Tardella, F. M. y Zeballos, H. (2014). How environment and grazing influence floristic composition of dry Puna in the southern Peruvian Andes. *Phytocoenologia*, 44(1-2), 103-119.
- Farfán Loaiza, R. D. y Farfán Tenicela, E. R. (2012). *Producción de pasturas cultivadas y manejo de pastos naturales altoandinos*. Lima, Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Flores, E. R. (2017). Cambio climático: Pastizales altoandinos y seguridad alimentaria. *Revista de Glaciares y Ecosistema de Montaña*, 1, 73-80.
- Flórez Martínez, A. (2005). *Manual de pastos y forrajes altoandinos*. Lima, ITDG AL y OIKOS.
- Flórez, A. y Malpartida, E. (1987). *Manejo de praderas nativas y pasturas en la región altoandina del Perú*. 2 vols. Lima, Banco Agrario.
- Genin, D. y Alzérreca, H. (2006). Campos nativos de pastoreo y producción animal en la puna semiárida y árida andina. *Sécheresse / Science et changements planétaires*, 17(1-2), 265-274.
- Gómez, M. I. y Sarmiento, J. (2015). Fauna de la Cordillera Real. En Meneses, R. I., Beck, S. G. y Anthelme, F. (Eds.). *La Cordillera Real y sus plantas*, 48-63. La Paz, IRD y Herbario Nacional de Bolivia.
- Herrera, A., Orsini, C. y Lane, K. (Eds.). (2006). *La complejidad social en la Sierra de Ancash: Ensayos sobre paisaje, economía y continuidades culturales*. Milán, Civiche Raccolte d'Arte Applicata del Castello Sforzesco – Raccolte Extraeuropee; Lima, Punku, Centro de Investigación Andina.
- Jamtgaard, K. A. (1989). Targeting production systems in the small ruminant CRSP: A typology using cluster analysis. En McCorkle, C. M. (Ed.). *The social sciences in international agricultural research: Lessons from the CRSPs*, 195-212. Boulder, Colorado, Lynn Reinner Publishers.
- MINAM. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal: Memoria descriptiva*. Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Oscanoa Gamarra, L. L. (2016). *Influencia de las prácticas de conservación de suelos y mejora de la función hidrológica de praderas naturales altoandinas*. Tesis de doctoral. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Salvador Poma, M. L. (2002). *Manual de pastos nativos del Parque Nacional Huascarán*. Huaraz, Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA).
- Tacuna, R. E., Aguirre, L. y Flores, E. R. (2015). Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados. *Ecología Aplicada*, 14(2), 191-200.
- Tapia Núñez, M. E. (1984a). El ecosistema de los Andes del sur del Perú y su relación con los pastizales. En Tapia Núñez, M. E. y Flores Ochoa, J. A. (Eds.). *Pastoreo y pastizales de los Andes del sur del Perú*, 50-76. Lima, Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria.
- Tapia, M. E. (1984b). *Descripción botánica de las principales especies forrajeras y asociaciones vegetales de los Andes del sur del Perú*. En Tapia Núñez, M. E. y Flores Ochoa, J. A. (Eds.). *Pastoreo y pastizales de los Andes del sur del Perú*, 77-189. Lima, Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria.
- Tapia, M. E. (1984c). *Evaluación y mejoramiento de los pastizales*. En Tapia Núñez, M. E. y Flores Ochoa, J. A. (Eds.). *Pastoreo y pastizales de los Andes del sur del Perú*, 221-302. Lima, Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria.
- Yalli Huamani, T. B. (2017). *Efecto del pastoreo con llamas y vacunos en la función hídrica del pastizal*. Tesis de maestría. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Wilcox, B. P., Bryant, F. C. y Fraga, V. B. (1987). An evaluation of range condition on one range site in the Andes of central Peru. *Journal of Range Management*, 40(1), 41-45.
- Zarria Samanamud, M. R. (2015). *Inventario y estrategias de mejora de los pastizales de los sistemas de producción de alpacas de la sierra central*. Tesis de magister. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina.

Anexo 1. Lista de especies encontradas en pastizales de Rurek, Cordillera Blanca.

Familia	Especie	Tipo de Especie	Deseabilidad	Fuente
Asteraceae	<i>Belloa kunthiana</i>	Anual	I	LEUP
Asteraceae	<i>Belloa</i> spp.	Anual	I	LEUP
Asteraceae	<i>Bidens andicola</i>	Anual	PD	LEUP
Asteraceae	<i>Gamochaeta americana</i>	Perenne	PD	Local
Asteraceae	<i>Hypochaeris taraxicoides</i>	Anual	PD	LEUP
Asteraceae	<i>Paranephelius bullatus</i>	Anual	PD	LEUP
Asteraceae	<i>Werneria nubigena</i>	Perenne	I	LEUP
Cactaceae	<i>Opuntia floccosa</i>	Perenne	I	LEUP
Campanulaceae	<i>Hypsela reniformis</i>	Anual	I	Local
Caryophyllaceae	<i>Paronychia andina</i>	Anual	PD	LEUP
Cyperaceae	<i>Carex ecuadorica</i>	Perenne	PD	LEUP
Cyperaceae	<i>Scirpus rigidus</i>	Perenne	PD	LEUP
Fabaceae	<i>Astragalus garbancillo</i>	Perenne	I	LEUP
Fabaceae	<i>Trifolium amabile</i>	Anual	D	LEUP
Geraniaceae	<i>Geranium sessiliflorum</i>	Perenne	PD	LEUP
Iridaceae	<i>Orthrosanthus occissapungus</i>	Perenne	I	LEUP
Juncaceae	<i>Juncus ebracteatus</i>	Perenne*	PD	LEUP
Juncaceae	<i>Juncus</i> spp.	Perenne*	PD	LEUP
Juncaceae	<i>Luzula peruviana</i>	Perenne	PD	(Oscanoa, 2016)
Lamiaceae	<i>Lepechinia meyenii</i>	Perenne	I	Local
Malvaceae	<i>Acaulimalva engleriana</i>	Perenne	PD	LEUP
Orobanchaceae	<i>Castilleja nubigena</i>	Perenne	I	Local
Plantaginaceae	<i>Plantago australis</i>	Perenne	PD	LEUP
Plantaginaceae	<i>Plantago lanceolata</i>	Perenne	PD	LEUP
Plantaginaceae	<i>Plantago major</i>	Perenne	PD	LEUP
Plantaginaceae	<i>Plantago tubulosa</i>	Perenne	PD	LEUP
Poaceae	<i>Aciachne pulvinata</i>	Perenne	I	LEUP
Poaceae	<i>Agrostis breviculmis</i>	Perenne	PD	LEUP
Poaceae	<i>Brachypodium mexicanum</i>	Perenne	PD	(Salvador, 2002)
Poaceae	<i>Bromus catharticus</i>	Anual	D	LEUP
Poaceae	<i>Calamagrostis rigescens</i>	Perenne	PD	LEUP
Poaceae	<i>Calamagrostis vicunarum</i>	Perenne	PD	LEUP
Poaceae	<i>Dactylis glomerata</i>	Perenne	D	LEUP
Poaceae	<i>Digitaria</i> spp.	Anual	D	Local
Poaceae	<i>Dissanthelium</i> spp.	Anual	D	Local
Poaceae	<i>Festuca humilior</i>	Perenne	D	LEUP
Poaceae	<i>Jarava ichu</i>	Perenne	PD	LEUP
Poaceae	<i>Muhlenbergia fastigiata</i>	Perenne	PD	LEUP
Poaceae	<i>Muhlenbergia peruviana</i>	Anual	PD	LEUP
Poaceae	<i>Nassella brachyphylla</i>	Anual	PD	LEUP
Poaceae	<i>Paspalum pilgerianum</i>	Anual	D	LEUP

Poaceae	<i>Poa</i> spp.	Perenne	D	Local
Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia volcanica</i>	Perenne	I	LEUP
Polygonaceae	<i>Rumex acetosa</i>	Perenne	I	LEUP
Ranunculaceae	<i>Ranunculus flagelliformis</i>	Perenne*	PD	Local
Ranunculaceae	<i>Ranunculus praemorsus</i>	Perenne	PD	Local
Rosaceae	<i>Lachemilla orbiculata</i>	Perenne	PD	LEUP
Rosaceae	<i>Lachemilla pinnata</i>	Perenne	PD	LEUP
Rosaceae	<i>Rosaceae</i> spp.	Perenne	PD	Local
Schoepfiaceae	<i>Quinchamalium procumbens</i>	Anual	I	LEUP

* Especies perennes en humedales y cuerpos de agua, pero en el caso de pastizales han tenido un comportamiento anual.

D= Deseable, PD= Poco Deseable, I= Indeseable

Variación del pH en Aguas Superficiales Debido a Drenajes Ácidos de Roca en la Subcuenca Quillcay, Huaraz, Ancash

Variation of pH in Surface Waters Due to Acid Rock Drainage in the Quillcay Subbasin, Huaraz, Ancash

Gabriel Martel Valverde¹, Juan C. Torres Lázaro¹ y W. Harrinson Jara Infantes¹

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

Resumen

El objetivo de esta investigación es caracterizar la variabilidad del pH en la subcuenca Quillcay, basada en mediciones puntuales directas. Con este fin, se realizó la recolección de datos en diferentes puntos de la subcuenca dentro de tres microcuencas en 2016 y 2017. En total se midieron treinta y siete puntos dentro de la subcuenca Quillcay: diez en la microcuenca Cojup, diecisiete en la microcuenca Quillcayhuanca y diez en la microcuenca Shallap.

Las mediciones en las microcuencas y sus aportantes fueron analizadas con la finalidad de determinar tendencias que muestren si los valores exceden los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA de Agua). Además, se realizó un levantamiento geológico en las cabeceras de la subcuenca Quillcay para poder identificar las formaciones geológicas, con lo cual se pudo determinar zonas de alteración y afloramiento de un pórfido andesítico en la quebrada Cayesh, que contiene minerales generadores de acidez.

Para mostrar el retroceso glaciar, se analizó las cabeceras de las microcuencas mediante la comparación de imágenes satelitales recuperadas de Google Earth Pro el 7 de setiembre de 2018. Las imágenes a comparar fueron obtenidas mediante la herramienta de Google Earth Pro (Historial de Imágenes) que permitió obtener imágenes de octubre 2013 y julio 2017.

Palabras clave: *Drenaje ácido de roca (DAR), ECA de agua, Cordillera Blanca, retroceso glaciar*

Abstract

The objective of this research is to characterize the pH variability in the Quillcay subbasin, based on direct point measurements. To this end, data collection was carried out in different points of the subbasin within three microbasins in 2016 and 2017. In total, thirty-seven points were measured within

the Quillcay subbasin: ten in the Cojup microbasin, seventeen in the Quillcayhuanca microbasin and ten in the Shallap microbasin.

The measurements in the microbasins were analyzed in order to determine trends that show if the values exceed the Environmental Quality Standards for Water (Water EQS). In addition, a geological survey was carried out in the headwaters of the Quillcay subbasin in order to identify the geological formations, from which it was possible to determine zones of alteration and the outcrop of an andesitic porphyry in the Cayesh Valley, which contains acid-generating minerals.

To show the glacial retreat, the headwaters of the microbasins were analyzed by comparing satellite images retrieved from Google Earth Pro on September 7, 2018. The images to be compared were obtained using the Google Earth Pro tool (Image History) that yielded images from October 2013 and July 2017.

Keywords: *Acid rock drainage (ARD), environmental quality standards for water, Cordillera Blanca, glacial retreat*

Introducción

El propósito de esta investigación es conocer la variación del pH como consecuencia de la generación de drenajes ácidos de roca, producto del retroceso glaciar en la subcuenca Quillcay, que se ubica en la parte media de la cuenca del río Santa en Ancash, Perú. La importancia de conocer la variación del pH en los sistemas acuáticos radica en tres aspectos. Primero, las aguas ácidas producen varios efectos nocivos para la flora y fauna. El aumento de acidez de las aguas de ríos y lagos produce cambios en la vida acuática, impidiendo su reproducción (por ejemplo, la eclosión de las huevas) y causando deformaciones en los peces más jóvenes. La vegetación también sufre, no solo por las consecuencias del deterioro del suelo, sino porque muchas especies no pueden adaptarse a

las nuevas condiciones, lo que puede resultar en su extinción. Segundo, la acidez origina las condiciones para que los metales permanezcan en estado líquido dentro de lagos y ríos, produciendo alteraciones en los ecosistemas. Tercero, alto acidez en los sistemas acuáticos ácidos previene su uso para consumo humano, porque no está dentro de los Estándares de Calidad Ambiental. Debemos tener presente que la mayoría de la población peruana vive en las llanuras costeras del Pacífico y las laderas occidentales de los Andes, donde la tierra es árida y muy dependiente de la escorrentía del agua de las montañas y glaciares (Vergara et al., 2007).

En la Cordillera Blanca se encuentra una de las zonas con yacimientos de minerales ricos en sulfuros metálicos (Wilson, Reyes y Garayar, 1967). Esta condición ocasiona que algunas microcuencas estén siendo alteradas por estar expuestas a drenajes ácidos de roca. El impacto de la fusión de los glaciares en el ciclo hidrológico ha sido cuantificado en una escala regional, pero se requiere un análisis más específico y detallado en cada microcuenca con el fin de caracterizar y determinar la variabilidad de la calidad y caudal del agua con mayor precisión y plantear controles geológicos (Baraër et al., 2009).

La acidez se genera al producirse la lixiviación de zonas mineralizadas que anteriormente se mantuvieron cubiertos por los glaciares. El Perú está perdiendo superficie glaciar de manera constante. Se ha realizado un análisis por zonas (norte, centro y sur) y por cordilleras, determinando una tasa de reducción de 1.6013 km²/año para las cordilleras de la zona norte (Blanca, Huallanca, Huayhuash y Raura), una tasa de reducción de 1.5831 km²/año para las cordilleras de la zona sur (Apolobamba, Carabaya, Vilcanota, Vilcabamba, Ampato, Urubamba, Chila, Huanzo y La Raya) y una tasa de reducción de 0.6799 km²/año para las cordilleras de la zona centro (La Viuda, Chonta, Central, Huagoruncho y Huaytapallana) (INAIGEM, 2018:56).

Además, una vez que la formación de Drenaje Ácido de Roca (DAR) ha comenzado, es generalmente difícil y costoso de controlar o suprimir. Por lo tanto, la prevención o minimización de la oxidación de sulfuro en la fuente es la opción más crítica versus el tratamiento de aguas contaminadas con DAR (Alakangas, Andersson y Mueller, 2013).

El tema es especialmente relevante debido a que el proceso de acidificación puede originar en otras subcuencas donde el agua está usada como fuente para actividades agrícolas, ganaderas, consumo humano, entre otras. La microcuenca Cojup, que es parte de la subcuenca Quillcay, es actualmente la única fuente de agua potable para la ciudad de Huaraz y podría sufrir un proceso de acidificación en el futuro, dejando la ciudad desabastecida y generando conflictos.

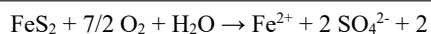
Objetivos

- Analizar los resultados de pH de del agua superficial en las microcuencas de Cojup, Quillcayhuanca y Shallap.
- Analizar el mapa geológico de la subcuenca Quillcay para poder identificar formaciones que pueden originar drenaje ácido de roca.
- Analizar el retroceso glaciar mediante la comparación de imágenes satelitales en las microcuencas de Cojup, Quillcayhuanca y Shallap.

Proceso de Formación de Drenaje Ácido de Roca en Áreas Glaciares

El área de estudio se encuentran en el ámbito de la Cordillera Blanca, la cual desde 1962 ha experimentado una pérdida de área glaciar de 445.81 km² (40.28%), según el análisis e interpretación de imágenes satelitales (INAIGEM, 2018). Esta desglaciación está exponiendo nuevas áreas, que estuvieron cubiertas con hielo durante miles de años, al aire y a la erosión de agua. El congelamiento y descongelamiento de la lámina de agua que rodea los minerales cautivos en las rocas debajo de los glaciares generan procesos de oxidación y lixiviación de los minerales, que pasan del estado sólido al estado líquido. Este proceso se agrava cuando los minerales presentes contienen sulfuros, como la pirita (FeS₂) que es el más común en la naturaleza, encontrándose en formaciones de rocas ígneas y depósitos sedimentarios (Martel, 2016).

Los sulfuros son estables y muy insolubles mientras no entren en contacto con agentes oxidantes como el oxígeno. En este caso los glaciares sirvieron como cápsulas. Actualmente, el retroceso glaciar crea condiciones reductoras que permiten la lixiviación del material por el incremento y la disponibilidad de oxígeno, esencial para la oxidación de sulfuros (Martel, 2016) de acuerdo con la ecuación general de oxidación de la pirita:



Por otro lado, el proceso de oxidación se podría dar de manera lenta. Sin embargo, la intervención de determinadas bacterias quimiolitótrofas, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, que tienen su desarrollo óptimo en condiciones de pH ácido, catalizando las reacciones de oxidación y obteniendo energía de este proceso, tiende a acelerar el proceso (Martel, 2016).

Descripción del Área de Estudio

El área de estudio comprende la subcuenca del río Quillcay, conformada por las microcuencas Cojup, Quillcayhuanca y Shallap. La subcuenca se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca del río Santa (Figura 1) teniendo una extensión importante dentro del Parque Nacional Huascarán. La ubicación de cada punto de monitoreo está indicada en la Tabla 1.

Metodología:

Levantamiento de Información Geológica

Fase I: Pre-campo

- Definición del objetivo y alcance del estudio a la escala 1/25,000.
- Recopilación y análisis de información secundaria existente.
- Interpretación de imágenes satelitales.
- Elaboración del plan de trabajo.

Fase II: Campo – Recolección de Información

- Reconocimiento, caracterización y descripción de depósitos cuaternarios.
- Reconocimiento, caracterización y descripción del basamento rocoso.
- Definición preliminar de las unidades geológicas existentes en el área de estudio.
- Ejecución de estaciones de mapeo geológico-estructural.
- Extracción de muestras representativas de suelos y rocas.

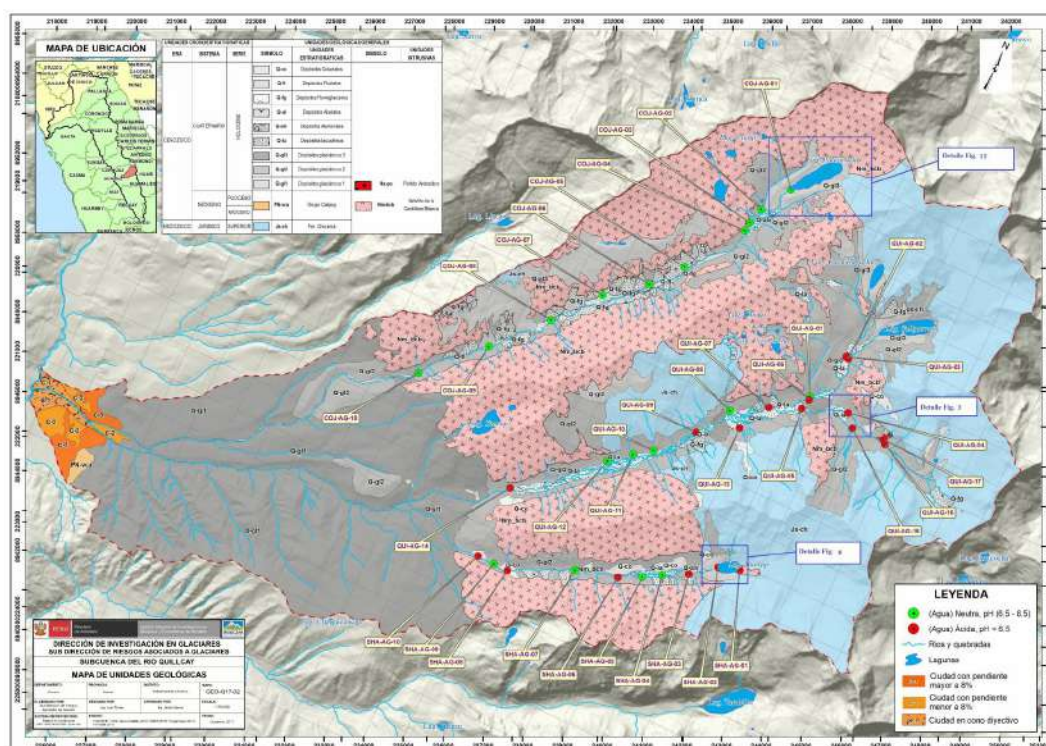


Figura 1. Unidades geológicas y puntos de monitoreo de calidad de agua en las microcuencas Cojup, Quillcayhuanca y Shallap. Fuente: INAIGEM.

Tabla 1. Coordenadas UTM (WGS 84) de los puntos de monitoreo en las microcuencas Cojup, Quillcayhuanca y Shallap.

Coordenadas UTM (WGS 84) de los puntos de monitoreo en la microcuenca Cojup			Coordenadas UTM (WGS 84) de los puntos de monitoreo en la microcuenca Quillcayhuanca			Coordenadas UTM (WGS 84) de los puntos de monitoreo en la microcuenca Shallap		
Código del punto de monitoreo	Este	Norte	Código del punto de monitoreo	Este	Norte	Código del punto de monitoreo	Este	Norte
COJ - AG - 01	238324	8960041	QUI - AG - 01	241232	8955057	SHA - AG - 01	241504	8949865
COJ - AG - 02	237808	8959200	QUI - AG - 02	241757	8956460	SHA - AG - 02	240924	8949681
COJ - AG - 03	237683	8958730	QUI - AG - 03	241699	8956482	SHA - AG - 03	240270	8949178
COJ - AG - 04	237649	8958469	QUI - AG - 04	242400	8955095	SHA - AG - 04	239616	8948822
COJ - AG - 05	236560	8956850	QUI - AG - 05	241174	8954638	SHA - AG - 05	239138	8948550
COJ - AG - 06	235879	8956000	QUI - AG - 06	241270	8954965	SHA - AG - 06	238521	8948259
COJ - AG - 07	234828	8955175	QUI - AG - 07	240340	8954289	SHA - AG - 07	237368	8947925
COJ - AG - 08	233825	8953945	QUI - AG - 08	239384	8953727	SHA - AG - 08	235663	8947135
COJ - AG - 09	232573	8952550	QUI - AG - 09	238805	8952803	SHA - AG - 09	235251	8947139
COJ - AG - 10	231108	8951060	QUI - AG - 10	237943	8951835	SHA - AG - 10	234748	8947157
-	-	-	QUI - AG - 11	237450	8951474	-	-	-
-	-	-	QUI - AG - 12	236899	8951032	-	-	-
-	-	-	QUI - AG - 13	239831	8953424	-	-	-
-	-	-	QUI - AG - 14	234796	8949217	-	-	-
-	-	-	QUI - AG - 15	242676	8954762	-	-	-
-	-	-	QUI - AG - 16	243677	8954734	-	-	-
-	-	-	QUI - AG - 17	243595	8954844	-	-	-

- Registro fotográfico de los depósitos cuaternarios y del basamento rocoso.

Fase III: Gabinete – Sistematización, Análisis y Evaluación

- Procesamiento de la información primaria con el uso de programas especializados.
- Sistematización de la información primaria con el uso de programas especializados.
- Análisis e interpretación de los resultados de laboratorio petrográfico y paleontológico (si fuere el caso).
- Definición final de las unidades geológicas existentes en el área de estudio.
- Elaboración del mapa de unidades geológicas (formaciones geológicas y depósitos cuaternarios).
- Elaboración de informe final.

Medición del pH

Hubo tres criterios principales para medir el pH en el área de estudio:

- Se establecieron los puntos en el cauce principal y algunos tributarios en las márgenes derecha e izquierda en las microcuencas Cojup, Quillcayhuanca y Shallap.

- El trabajo de campo se realizó a través de campañas de muestreo llevadas a cabo en diferentes estaciones durante los años 2016 y 2017 en un total de 37 puntos. Dicho trabajo incluyó la ubicación de las estaciones y las mediciones de campo.

- En cada estación se registraron parámetros fisicoquímicos, tal como oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH) y temperatura, para lo cual se utilizó la sonda multi-paramétrica portátil Hanna Hi 9829.

Microcuenca Quillcayhuanca

En la microcuenca Quillcayhuanca, en términos geológicos, se tiene al intrusivo del batolito de la Cordillera Blanca (Nm-bcb), la Formación Chicama (J-ch) y el Stock Andesítico. El primero está conformado por rocas ígneas intrusivas, el segundo, por rocas sedimentarias jurásicas constituidas principalmente por arcillitas y areniscas, asociadas a los stocks o pórfidos andesíticos que estén afectando naturalmente las aguas superficiales y, por ende, su calidad (Figura 2).

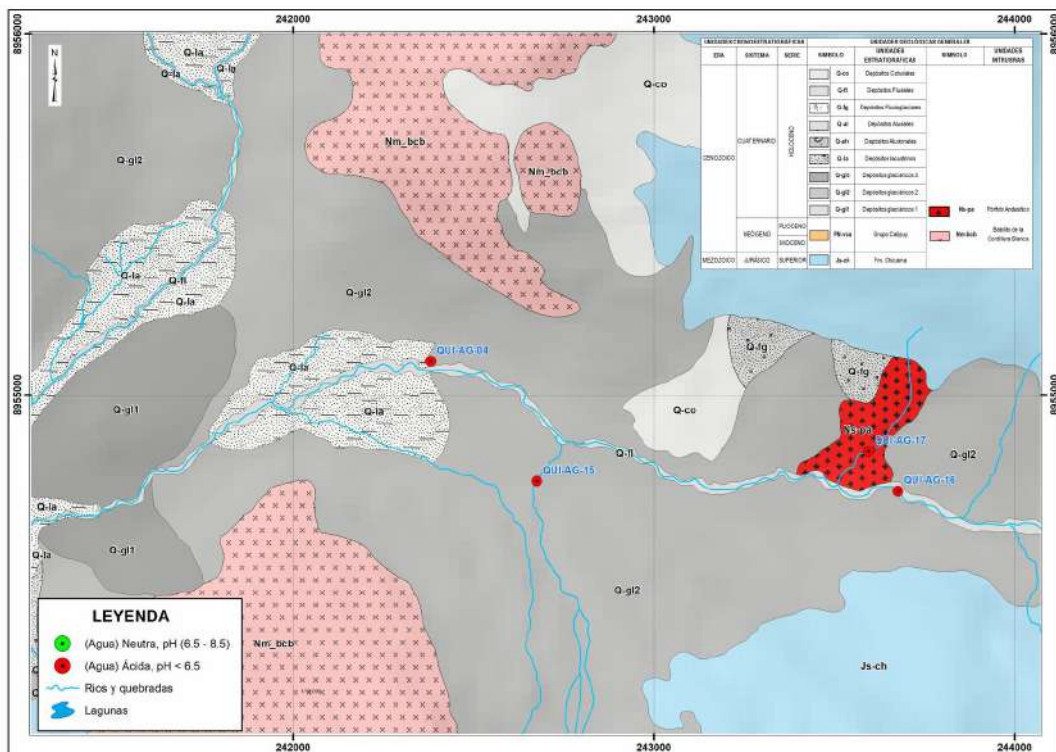


Figura 2. Mapa de unidades geológicas de la quebrada Cayesh. Fuente: INAIGEM.

En esta microcuenca, la superficie glaciar es de 1520.53 ha (1452.88 ha de glaciar limpio; 67.64 ha de glaciar cubierto). Encontramos evidencias del retroceso glaciar, como se puede apreciar en la quebrada Cayesh. Al realizar el análisis comparativo de las imágenes (Figuras 3a y 3b), se puede observar una fragmentación de la zona glaciar que deja expuesta una nueva zona. Hay un afloramiento

pequeño de un “stock” o pórfido andesítico, una roca ígnea hipoabisal, la cual presenta en forma diseminada mineral como pirita (FeS_2), calcopirita ($CuFeS_2$) y esfalerita (ZnS), con una alteración tipo limonitización y una intensidad incipiente, asociada mineralógicamente a abundantes óxidos de hierro (véase Figuras 4a y 4b).



Figura 3a. Cabecera de la microcuenca Quillcayhuanca en octubre 2013. Se puede apreciar las lagunas de Cuchillacocha y Tulparaju que desembocan junto a la quebrada Cayesh y forman la quebrada Quillcayhuanca. El círculo de color rojo entrecortado representa el área de afloramiento del stock o pórfido andesítico.

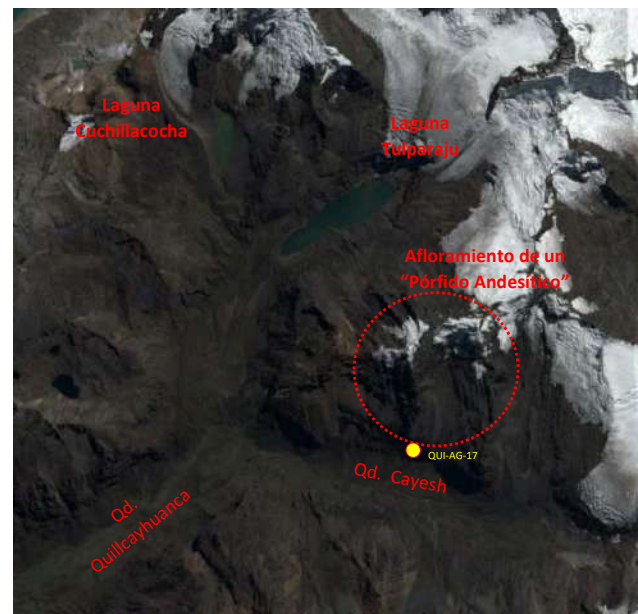


Figura 3b. Cabecera de la microcuenca Quillcayhuanca en julio 2017. El círculo de color rojo entrecortado representa el área de afloramiento del “stock o pórfido andesítico” que es el generador del DAR y aporta acidez a la quebrada Cayesh. El punto de color amarillo representa el punto de monitoreo QUI-AG-17 que nos permite analizar la variación temporal del pH.

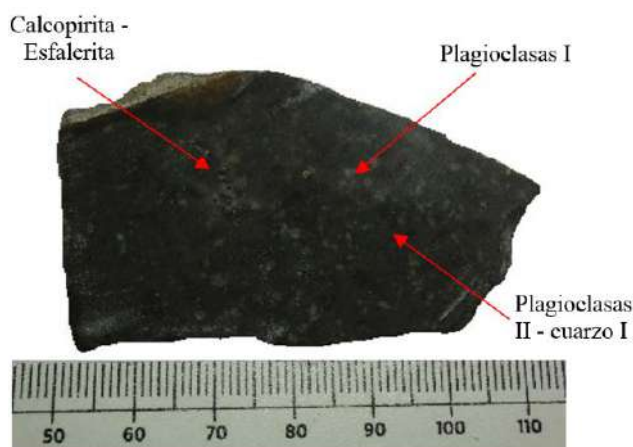


Figura 4a. Vista de una muestra de roca representativa de un pórfido andesítico de la quebrada Cayesh.

Las condiciones descritas anteriormente nos permiten analizar la variación temporal del pH en el punto QUI-AG-17, influenciado por el afloramiento del pórfido andesítico. La Figura 5 muestra una tendencia que incrementa la acidez de manera leve en marzo 2016 (3.76), julio 2016 (3.45), octubre 2016 (3.24), marzo 2017 (3.11), junio 2017 (3.51) y noviembre 2017 (3.5). Esta tendencia podría verse incrementada si la exposición del afloramiento del pórfido andesítico se incrementara.

Efectos en la Calidad del Agua

En esta microcuenca la generación del Drenaje Ácido de Roca afecta la calidad de las aguas superficiales, siendo la acidez una de las condiciones más críticas. Al analizar los resultados desde marzo 2016 hasta noviembre 2017, se puede apreciar una diferenciación importante entre los dos márgenes de la quebrada. Solo los aportantes de la margen derecha de la quebrada Quillcayhuanca presentan



Figura 4b. Fotomicrografía con minerales opacos (OPs) intercrecidos con esfalerita (ef), de reflexiones internas rojizas, cloritas (CLOs) y agregados granulares de cuarzo II (cz II) relleno de plagioclasas II (PGLs II) y cuarzo I (cz I).

agua de pH neutro (6.5-8.5). Estos aportantes que mezclan sus aguas en el cauce principal no logran neutralizar la acidez proveniente de aguas arriba, y el resultado final es su acidificación. En contraste, todos los aportantes de la margen izquierda de la quebrada Quillcayhuanca presentan agua de pH ácido (<6.5) en los puntos de monitoreo QUI-AG-1, 5, 7, 9 y 13. Además, dentro de la quebrada Cayesh en todos los puntos QUI-AG-4, 15, 16 y 17, se presentan condiciones de acidez (Figura 6).

Microcuenca Shallap

Geológicamente, la cabecera de la microcuenca Shallap está dominada por rocas sedimentarias jurásicas de la Formación Chicama (Js-ch), constituido principalmente por arcillitas y areniscas metamorizadas. Esta litología podría estar asociada a los stocks o pórfidos andesíticos mineralizados, los

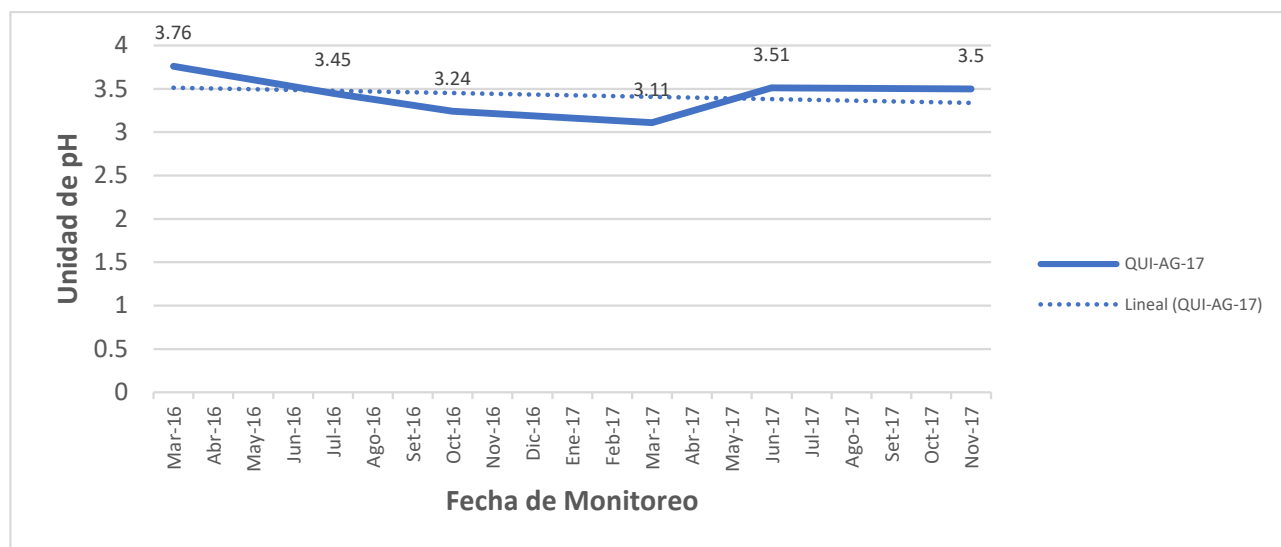


Figura 5. Variación temporal del pH en el punto QUI-AG-17 del afloramiento del pórfido andesítico.

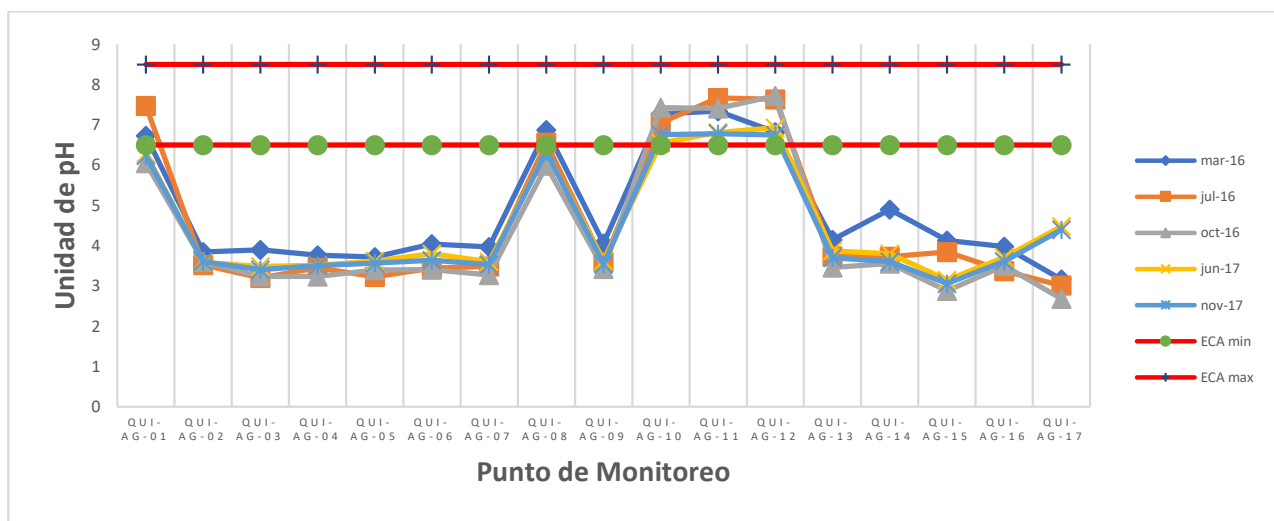


Figura 6. Valores de pH medidos durante los años 2016 y 2017 en las 17 estaciones de monitoreo en la microcuenca Quillcayhuanca.

cuales afectarían naturalmente las aguas superficiales y, por ende, su calidad. Asimismo, se tiene el batolito de la Cordillera Blanca (Nm-bcb), prácticamente dominando el tipo de basamento rocoso aguas abajo de la laguna Shallap (Figura 7).

En esta microcuenca, la superficie glaciaria es de 640.65 ha (569.76 ha de glaciar limpio; 70.89 ha de glaciar cubierto). En la cabecera de la microcuenca Shallap, se encuentra la laguna del mismo nombre, que está sufriendo un proceso de acidificación. En esta zona, el retroceso glaciario es poco evidente, pero

al realizar el análisis comparativo de las imágenes (Figuras 8a y 8b), se puede apreciar los cambios que se han dado.

Las evidencias de la acidificación en la quebrada Shallap también son claras al realizar el análisis de la variación temporal del pH en el punto SHA-AG-01 (entrada a la quebrada Shallap), como se puede apreciar en la Figura 9, en agosto 2016 (3.63), diciembre 2016 (3.9), junio 2017 (3.61) y, finalmente, noviembre 2017 (3.48). La línea de tendencia muestra que el pH está disminuyendo de manera paulatina.

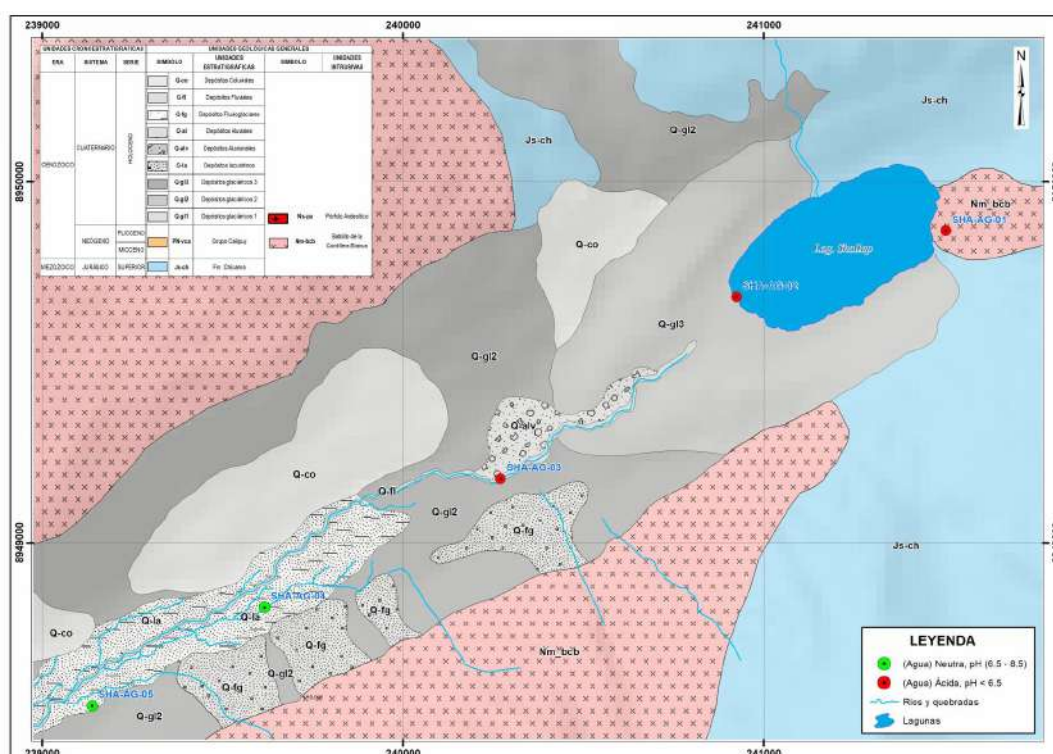


Figura 7. Mapa de unidades geológicas de la quebrada Shallap. Fuente: INAIGEM.



Figura 8a. Cabecera de la microcuenca Shallap en julio 2013. Se puede apreciar la laguna Shallap que origina la quebrada Shallap. El círculo de color rojo entrecortado representa el área de generación de DAR. Fuente: INAIGEM.



Figura 8b. Cabecera de la microcuenca Shallap en julio 2017. Comparando con 2013, se puede apreciar que no existen cambios evidentes en cuanto al retroceso glaciar. Fuente: INAIGEM.

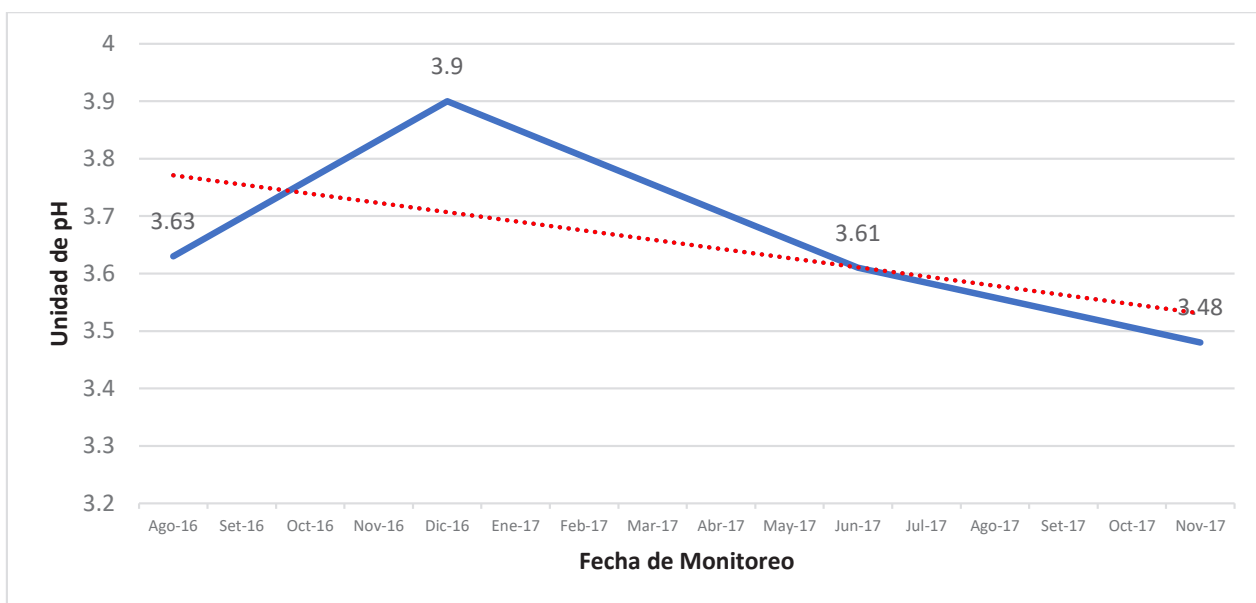


Figura 9. Variación temporal del pH en el punto SHA-AG-01 de salida de la quebrada Cayesh.

Efectos en la Calidad del Agua

La pérdida de la calidad de las aguas superficiales en la microcuenca Shallap es evidente según los resultados analizados durante los años 2016 y 2017. Al analizar el pH en las diferentes estaciones de monitoreo y compararlo con los ECA-Agua (Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales), se puede apreciar que sólo en las estaciones de monitoreo 6 y 7, que son aportantes a la quebrada Shallap, el pH se mantiene dentro de los Estándares de Calidad Ambiental. En general, toda la microcuenca presenta rangos de pH ácidos (Figura 10).

Microcuenca Cojup

En términos geológicas, la microcuenca Cojup tiene una reducida área de rocas sedimentarias jurásicas de la Formación Chicama (Js-ch), conformados por arcillitas y areniscas metamorizadas. El dominio litológico de la cabecera de la microcuenca corresponde a las rocas ígneas intrusivas del batolito de la Cordillera Blanca (Nm-bcb). Al parecer, esto condiciona las características de pH de las aguas superficiales, los cuales son neutrales, de buena calidad para consumo humano (Figura 11).

En esta microcuenca la superficie glaciar es de 853.18 ha (792.38 ha de glaciar limpio; 60.80 ha de

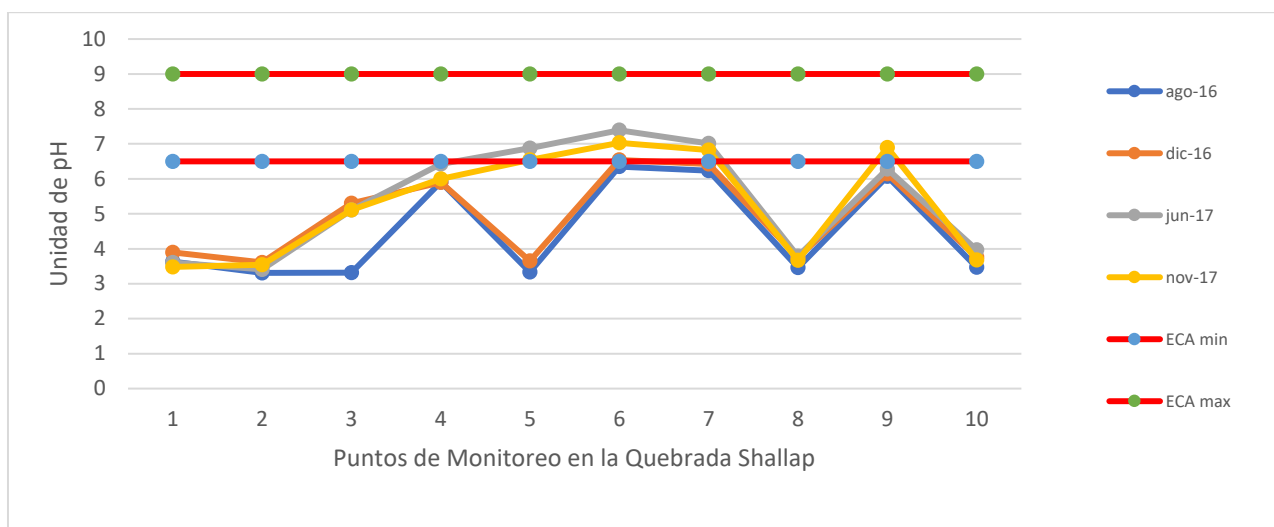


Figura 10. Valores de pH medidos durante los años 2016 y 2017 en las 17 estaciones de monitoreo en la microcuenca Quillcayhuanca.

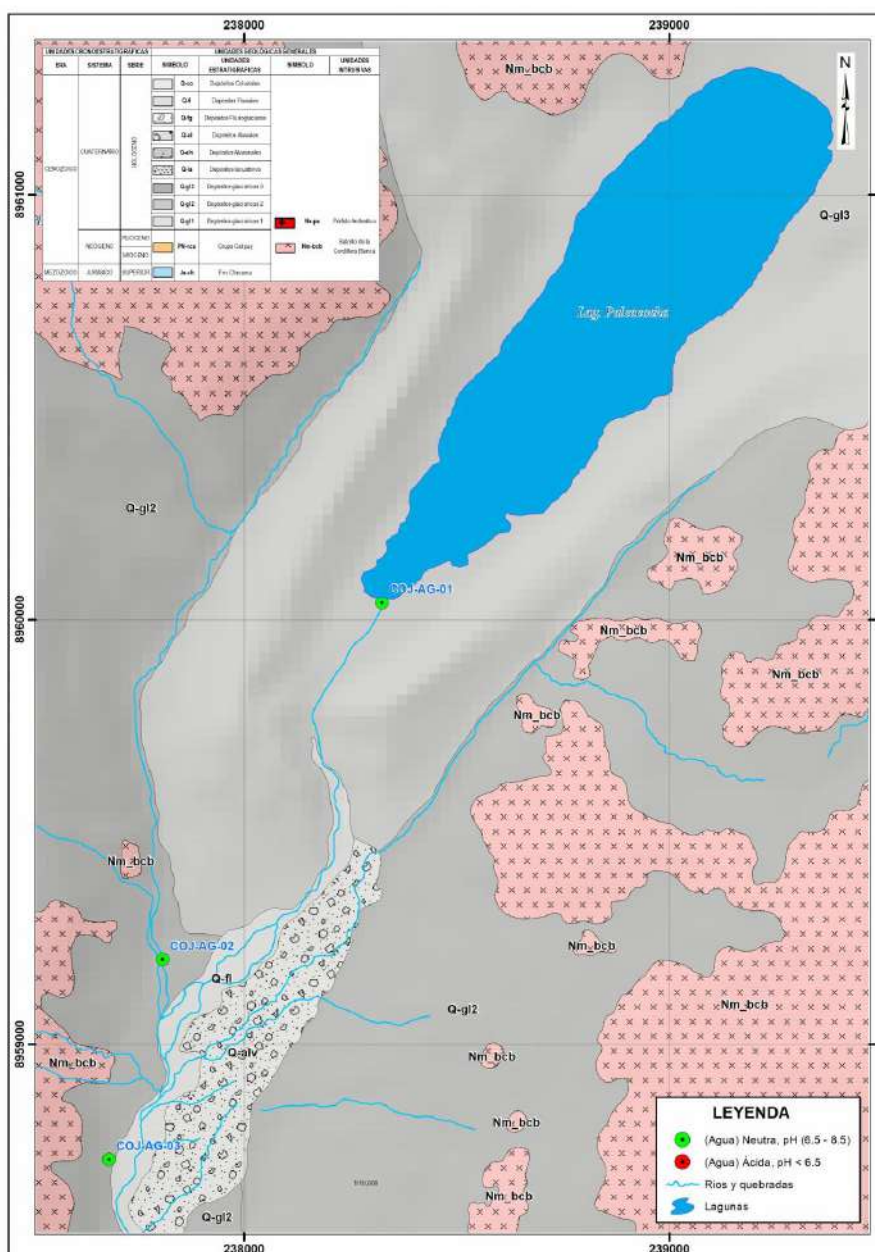


Figura 11. Mapa de unidades geológicas cerca de la laguna Palcacocha. Fuente: INAIGEM.



Figura 12a. Laguna Palcacocha en la cabecera de la microcuenca Cojup en julio 2013.



Figura 12b. Laguna Palcacocha en la cabecera de la microcuenca Cojup en julio 2017.



Figura 13a. Cabecera de la microcuenca Cojup en julio 2013.



Figura 13b. Cabecera de la microcuenca Cojup en julio 2017.

glaciar cubierto). En la cabecera de la microcuenca Cojup, se encuentra ubicada la laguna Palcacocha que aguas abajo, dará origen al río Paria. La importancia de esta laguna es que sirve de fuente de agua potable a la ciudad de Huaraz. Al realizar el análisis comparativo de las imágenes (Figuras 12a y 12b), se puede apreciar que alrededor de la laguna Palcacocha no existen cambios drásticos en la superficie glaciar que puedan alterar la calidad del agua u ocasionar la generación de DAR. El mayor peligro de afectación a la calidad de las aguas superficiales podría estar asociado al desprendimiento y caída de glaciares colgantes, pudiendo originar avalanchas con dirección a la laguna Palcacocha y alterar la calidad del agua.

El análisis comparativo de las imágenes (Figuras 13a y 13b) en una zona próxima a la laguna Palcacocha muestra las evidencias del retroceso glaciar y nuevas zonas quedan expuestas en su totalidad. Esta exposición podría generar el peligro de bajar la calidad del agua superficial. Faltan estudios para corroborar esta aseveración.

Efectos en la Calidad del Agua

La calidad de las aguas superficiales en la microcuenca Cojup, presenta condiciones de buena calidad según los resultados analizados durante los años 2016 y 2017. Al analizar el pH en las diferentes estaciones de monitoreo y compararlo con los ECA-Agua (Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales), se puede apreciar que, en todas las estaciones aportantes y cauce principal, el pH se mantiene dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (Figura 14). Esto es más evidente al apreciar la presencia de truchas (*Oncorhynchus mykiss*) en la parte media de la microcuenca Cojup.

Conclusiones y Recomendaciones

El presente estudio comprende tres microcuencas Cojup, Quillcayhuanca y Shallap, donde se evalúa la variación del pH producto del DAR. Los resultados proporcionan información sobre la variación del pH en los diferentes puntos de monitoreo dentro de las microcuencas. La metodología que aplicamos ha demostrado ser potencialmente aplicable a otras microcuencas donde se necesita una evaluación

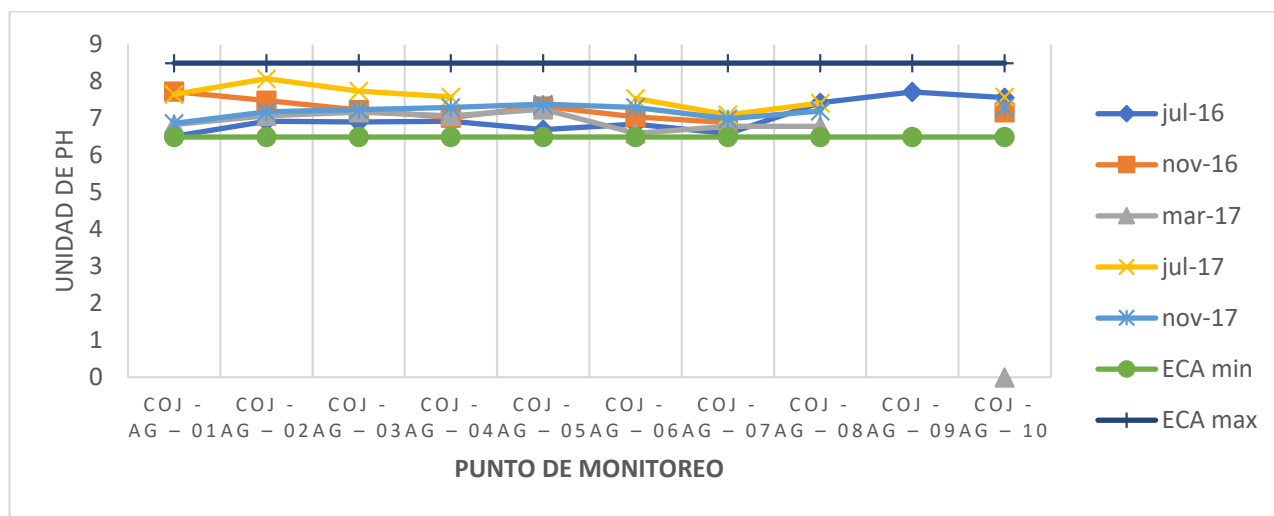


Figura 14. Valores de pH medidos durante los años 2016 y 2017 en las 10 estaciones de monitoreo en la microcuenca Cojup.

completa de la variación del pH por efectos de la generación del DAR.

Los resultados muestran que dentro de una subcuenca pueden existir microcuencas con diferentes condiciones. Las microcuencas de Shallap y Quillcayhuanca presentan condiciones de acidez permanente a lo largo del tiempo, la cual se va incrementando de manera muy leve. En cambio, la microcuenca de Cojup, hasta finales de 2017, mantiene condiciones de aguas neutras sin presencia de acidez en ninguno de sus puntos de monitoreo, por lo cual es usado como fuente por la EPS-Chavín para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Huaraz.

Los hallazgos indican que los niveles de alteración de la calidad del agua en las microcuencas Shallap y Quillcayhuanca podrían representar una amenaza para la salud de los seres humanos o los ecosistemas. La situación es peor en algunos afluentes de la quebrada Cayesh porque presentan los mayores niveles de acidez. La contaminación debe ser de origen natural y un producto del retroceso glaciar, visto que en esta zona no existe ninguna clase de actividad minera. Se necesita más investigación para poder determinar otras microcuencas generadoras de acidez en el ámbito de la Cordillera Blanca.

En la microcuenca Cojup se debe mantener monitoreo permanente debido a que, de acuerdo a la geología, existe la probabilidad de que en algún momento pueda generarse DAR, lo que cambiar la acidez las aguas provenientes de laguna Palcacocha y el resto de la quebrada, haciéndolas inutilizables como fuente de agua potable para la ciudad de Huaraz.

Imágenes Satelitales

Google. (s.f.). [1] Imagen de la microcuenca Quillcayhuanca en Image © 2018 CNES / Airbus. [2] Imagen de la microcuenca Shallap en Image © 2018 DigitalGlobe. [3] Imagen de la microcuenca Cojup en Image © 2018 CNES / Airbus. Recuperadas de Google Earth Pro el 7 de setiembre 2018.

Referencias

- Alakangas, L., Andersson, E. y Mueller, S. (2013). Neutralization/prevention of acid rock drainage using mixtures of alkaline by-products and sulfidic mine wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 7907–7916.
- Baraër, M., McKenzie, J., Mark, B. G., Bury, J. T. y Knox, S. (2009). Characterizing contributions of glacier melt and groundwater during the dry season in a poorly gauged catchment of the Cordillera Blanca (Peru). *Advances in Geosciences*, 22, 41–49.
- EPA. (1994). *Method 200.7, Revision 4.4 [EMMC Version]. Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry*. Cincinnati, Ohio, U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- INAIGEM. (2018). *Inventario nacional de glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú*. Huaraz, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).
- Martel Valverde, G. (2016). Los ríos rojos en la Cordillera de los Andes: Alteración y acidificación de las aguas superficiales. *Boletín INAIGEM*, 1, 51-56. Huaraz,

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).

Eos, Transactions, American Geophysical Union, 88(25), 261–263.

Vergara, W., Deeb, A. M., Valencia, A. M., Bradley, R. S., Francou, B., Zarzar, A.,... Haussling, S. (2007). Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes.

Wilson, J., Reyes, L. y Garayar, J. (1967). Geología de los cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari. *Boletín*, 16. Lima, Servicio de Geología y Minería.

Evaluación de la Artrópodo-fauna Asociada a los Bosques de *Polylepis* de la Región Puno, Perú

Evaluation of the Arthropodofauna Associated with *Polylepis* Forests of the Puno Region, Peru

Anahí J. Oroz-Ramos^{1,2}, Abdhiel A. Bustamante-Navarrete^{1,3}, Jhony Farfán-Flores, Oscar J. Santander-Azpilcueta^{1,4,5} y Ana M. Rodríguez-Veintemilla⁶

¹Colección Entomológica, Facultad de Ciencias, Escuela Profesional de Biología, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

²anahijeannette@yahoo.com / ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1833-4204>

³abdhiel77@gmail.com / ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8120-1274>

⁴oscarjesusaz@gmail.com / ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2463-9998>

⁵Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco

⁶Investigadora independiente

Resumen

Se determinó la diversidad de la artrópodo-fauna en cinco bosques de *Polylepis* de la Región Puno: Chingo, Bellavista, Lawa Lawani, Quilcapunku y Torno. Se registraron 23 órdenes y 91 familias de artrópodos entre Insecta, Araneae y Miriapoda. La metodología incluyó el uso de trampas Malaise, de caída (pitfall), trampas de luz, red entomológica y muestreo directo. Los análisis indican que el bosque más diverso es el de Bellavista, junto a Chingo. Ambos bosques son agrupados, a su vez, por los índices de similitud (Morisita) en dendrogramas que, además, indican la agrupación Torno-Quilcapunku como la de los dos bosques menos diversos). Se analizan los grados de alteración de los bosques que ocasionan la aparición de ciertos grupos de insectos y, por lo tanto, una mayor diversidad. Se hace, además, una rápida revisión de la influencia de la exposición en la composición de los insectos, que arroja como resultado que en las zonas más expuestas existe una mayor diversidad.

Palabras Clave: Cambio climático, Andes tropicales, artrópodos, *Polylepis*, *queñua*, bosques, diversidad

Abstract

The diversity of the arthropod fauna was determined in five *Polylepis* forests of the Puno Region: Chingo, Bellavista, Lawa Lawani, Quilcapunku and Torno. There were 23 orders and 91 families of arthropods between Insecta, Araneae and Miriapoda. The methodology included the use of Malaise traps,

pitfall traps, light traps, entomological net and direct sampling. The analyses indicate that the most diverse forest is that of Bellavista, together with Chingo. Both forests are grouped in turn by the similarity indexes (Morisita) in dendrograms that also indicate the Torno-Quilcapunku group as containing the two least diverse forests. The degree of alteration of the forests is analyzed, which causes the appearance of certain groups of insects and, thus, a greater diversity. There is also a quick review of the influence of exposure on the composition of insects, which results in a greater diversity in the most exposed areas.

Keywords: Climate change, tropical Andes, arthropods, *Polylepis*, *queñua*, forests, diversity

Introducción

Desde el punto de vista ecológico, las comunidades de insectos y artrópodos, en general, se desempeñan como organismos imprescindibles dentro de un ciclo natural, correspondiéndoles actividades específicas que los elevan a indicadores potenciales para la evaluación de diversidad, contaminación ambiental y alteración de hábitats por factores mecánicos (tala y quema) (Didham, 2002). Sin embargo, en la actualidad, el conocimiento de insectos es aún pobre, no existiendo acuerdo sobre el número total de familias en el mundo; se asume un promedio de 84 familias, donde la región Neotropical alberga el 92% de las familias. Se considera, entonces, de gran utilidad la identificación y captación de espacios particularmente ricos en especies, especies raras, endémicas y/o vulnerables que faciliten la

recopilación de información taxonómica que permita elaborar inventarios de calidad (Sánchez, 2003). Los bosques de *Polylepis* se constituyen como parte de estos espacios por considerarse como la vegetación clímax de los pisos ecológicos puneño y altoandino (3800 a 5200 msnm), identificado como uno de los hábitats más vulnerables de la Cordillera Oriental de América del Sur (Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia hasta el centro de Argentina y norte de Chile), por la fuerte presión antropogénica que sufre, efecto que reduce su área y uniformidad (Fjeldså y Kessler, 1996; Hjarsen, 1997; Fernández y Domínguez, 2001), y donde posiblemente como producto de estos cambios, muchos insectos pasen a la extinción sin ser reportados o descubiertos.

Hasta el momento, no existe ningún estudio realizado sobre insectos asociados a bosques de *Polylepis* en la Región Puno, salvo una mención (Yallico, 1992), siendo los estudios más cercanos los realizados en Ayacucho (Rossi et al., 2018), Ancash (Oroz-Ramos et al., 2017) y Cochabamba, Bolivia (Quinteros et al., 2006). El presente estudio se realizó en 2016.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

El área de estudio comprende cinco bosques que pertenecen a la Cordillera Oriental de la Región Puno, entre las provincias de Carabaya, Huancané y San Antonio de Putina (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación de los puntos de evaluación.

Bosque	WGS84 UTM 19L	Elevación
Lawa Lawani	0391894 8445823	4360-4602
Chingo	0377438 8447222	4380-4516
Torno	0410449 8339494	4029-4322
Bellavista	0402323 8348482	4012-4248
Quilcapunku	0419976 8353103	4028-4190

Bosque de Lawa Lawani (Figura 1)

El bosque de Lawa Lawani alcanza una elevación de 4602 msnm, y se encuentra situado entre los distritos de Usicayos y Coaza, en la provincia de Carabaya. El bosque bordea un conjunto de lagunas del mismo nombre, presentando su parche más grande en el extremo noroeste de la laguna. La ruta es utilizada por pobladores que se desplazan desde Coaza hacia Usicayos, así como por comuneros que pastan sus animales en áreas cercanas a las lagunas,

y que recolectan y extraen leña de forma extensiva debido a que los terrenos donde el bosque se localiza son de propiedad privada. La especie dominante en este bosque es *Polylepis triacontandra* Bitter. Se evaluó un parche de bosque húmedo de 1.5 ha, medianamente alterado con pedregosidad del 50%, 40% de suelo expuesto, musgo 25% y hojarasca 15%, y pendiente de 35°, asociado con *Chuquiraga*, *Berberis*, y *Satureja*.



Figura 1. Bosque de Lawa Lawani.

Bosque de Chingo (Figura 2)

El bosque de Chingo está ubicado en el distrito de Coaza, provincia Carabaya. La extracción de leña no es continua debido a que el bosque también presenta propietarios privados. Se observa pastoreo de ganado ovino y camélido en las áreas abiertas adyacentes al bosque. Zonas aledañas al bosque de Chingo han sufrido quema frecuente e incontrolada, principalmente para favorecer el cultivo de pastos para forraje de animales domésticos. Aun así, este bosque se presentó como el más extenso y el mejor conservado de los cinco bosques visitados.



Figura 2. Bosque de Chingo.

Altitudinalmente, va desde 4380 hasta 4516 msnm, tiene un 55% de pedregosidad y su pendiente es mayor a 45°. Las especies dominantes son *Polylepis triacontandra* Bitter y *Polylepis incarum* Bitter. El área de estudio comprende un parche de 4 ha, con 50° de pendiente, 25% de suelo expuesto, musgo 20% y hojarasca 10%. Es un bosque húmedo medianamente conservado, con flora asociada de *Chuquiraga*, *Berberis*, *Bacharis* y *Satureja*, y con pequeñas áreas abiertas para pastoreo.

Bosque de Torno (Figura 3)

El bosque de Torno se localiza en el distrito de Huatasani, provincia de Huancané, en la comunidad campesina de San Isidro de Torno, situado entre 4029 y 4322 msnm. Este bosque se mostró más árido que los dos primeros bosques, con escasez de musgos y líquenes asociados a los árboles. Cabe resaltar que la liberación gradual de agua se da por manantes dispersos, elemento que es aprovechado por comuneros que habitan las partes bajas para su consumo y regadío de sus parcelas. Tiene un 30% de pedregosidad y alcanza pendientes de hasta 45° de inclinación. La especie dominante es *Polylepis incarum* Bitter. El área de estudio es un parche árido de 3 ha, con grandes áreas abiertas para cultivo, suelo expuesto en un 50% y hojarasca en un 15%, asociado con *Berberis*, *Bacharis*, *Satureja* y *Puya*.



Figura 3. Bosque de Torno.

Bosque de Bellavista (Figura 4)

El bosque de Bellavista se localiza en la provincia de San Antonio de Putina. El bosque también mostraba aridez y presencia de manantes dispersos, así como continuidad con los parches de bosque de cumbres y laderas adyacentes. Se comprobó extracción de leña reciente durante la evaluación del bosque, lo

que hace suponer que la propiedad del bosque recae en varios comuneros que vienen extrayendo leña en forma continua. Este bosque se desarrolla en lugares con 50% de pedregosidad y en pendientes de hasta 45° de inclinación. La especie dominante es *Polylepis incarum* Bitter y el área de estudio comprende un parche de 1.5 ha de extensión con una pendiente de 45°, asociación con *Chuquiraga*, *Berberis* y *Bacharis*. Suelo expuesto en 60%, musgo en un 10% y hojarasca 15%. Es uno de los bosques intermedios entre mediano a fuertemente alterado, sin aparente apertura para áreas de cultivo.



Figura 4. Bosque de Bellavista.

Bosque de Quilcapunku (Figura 5)

El bosque de Quilcapunku está ubicado en el distrito de Quilcapunku, provincia de San Antonio de Putina, comunidad campesina Tupac Amaru de Quilcapunku. Alcanza altitudes por encima de 4100 msnm. Presenta áreas de cultivo próximas y en su interior, que no permiten la regeneración de la vegetación natural, conllevando a la erosión de suelos. Además, existe pastoreo de ganado vacuno, ovino y camélido por parte de los comuneros, quienes, aprovechando esta actividad, recogen, extraen y cortan ramas y troncos de queñua (*Polylepis*) para usarlas como combustible en la cocción de sus alimentos. La ausencia de manantes y riachuelos era evidente en este bosque, convirtiéndolo en el lugar más seco y con escasa cobertura vegetal en comparación con los otros bosques visitados. Las especies dominantes son *Polylepis incarum* Bitter y *P. triacontandra* Bitter. El bosque se desarrolla en lugares con 55% de pedregosidad y en pendientes de hasta 45° de inclinación. El parche evaluado se extiende en un área de 2 ha, con una pendiente de 60°, suelo expuesto en un 55%, musgo 5% y hojarasca 10%. Como flora asociada se tiene dominancia de

Bacharis y *Chuquiraga*. Es el bosque más alterado por la apertura de áreas de cultivo y la presencia de construcciones dentro del bosque.



Figura 5. Bosque de Quilcapunku.

Metodología

Determinación de estaciones de muestreo - Para la instalación de trampas se determinó un parche representativo de cada bosque, los cuales presentaban las siguientes características (Tabla 2).

Instalación de trampas - En cada parche evaluado se instalaron dos trampas Malaise, una dentro y otra afuera del bosque, para medir la diversidad de los artrópodos. Para evaluar los efectos de la fragmentación e influencia de la exposición sobre los insectos, se instalaron en promedio siete transectos perpendiculares al borde, cada uno constituido por 10 trampas de caída (vasos) colocadas a una distancia de 5 m una de otra.

Las trampas se instalaron por un tiempo de 48 horas para cada bosque, tomando nota de las condiciones: área a estudiar, pendiente y exposición. Para el caso de la exposición, se tomó en cuenta cuatro parámetros de 0 a 3, de mayor a menor exposición, respectivamente.

Manguero - Se realizó mediante el uso de mallas entomológicas para la obtención de muestras en el follaje de *Polylepis* y flora asociada. El manguero se realizó en un promedio de cinco árboles próximos a

cada uno de los transectos a razón de 20 “golpes” por árbol.

Colecta directa y por aspiración - Con el uso de pinzas flexibles y aspiradores entomológicos, se capturaron artrópodos de la corteza de los árboles de *Polylepis*, del musgo, y bajo piedras y troncos podridos. Además, se realizó el muestreo en cuerpos de agua lóticos ubicados en los bosques evaluados.

Transporte - Las muestras colectadas en las trampas Malaise, con red entomológica, colecta directa y aspiración se acondicionaron en papel toalla y luego fueron depositadas en contenedores de plástico. En el caso del material colectado por las trampas de caída (pitfall), intercepción y muestras acuáticas, se utilizaron viales plásticos y alcohol al 70% como medio de conservación.

Preparación, montaje e identificación - Las muestras se dispusieron en cámaras húmedas para devolverles la flexibilidad y facilitar su manipulación. Se procedió al montaje y etiquetado. Las identificaciones se realizaron con el uso de un microscopio estereoscópico de 40X-80X. De preferencia, el material fue identificado hasta el nivel de familia para facilitar el manejo de modelos estadísticos y poder relacionar la diversidad a nivel de jerarquía taxonómica (Martín Piera, 2000).

Tratamiento estadístico - El análisis estadístico se realizó sobre la base del total de las muestras obtenidas por método de colecta medible (trampas de caída o pitfall y Malaise). Los análisis se efectuaron utilizando el software PAST v.1.41 (Paleontological Statistics software package for education y data análisis). Todo el material se encuentra actualmente en la Colección Entomológica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Resultados y Discusión

El estudio de la diversidad de artrópodos en los bosques de *Polylepis* evaluados permitió el registro

Tabla 2. Caracterización de los puntos de muestreo.

Bosque	Área del parche	% musgo	% hojarasca	% de herbáceas	% suelo expuesto
Lawa Lawani	1.5 ha	25	15	25	40
Chingo	4 ha	20	10	20	25
Torno	3 ha		15	50	50
Bellavista	1.5 ha	10	15	30	60
Quilcapunku	2 ha	5	10	15	55

de 23 órdenes y 91 familias de artrópodos entre Insectos, Araneae y Miriápoda: 3 morfoespecies de Acari, 4 morfotipos de Araneae, 19 familias de Coleoptera (escarabajos), 21 familias de Diptera (moscas y mosquitos), 17 familias de Hymenoptera (abejas, avispas y hormigas) (Tabla 3).

A diferencia de estudios de artrópodos en bosques de *Polylepis* realizados en la región Ancash (Oroz-Ramos et al., 2017), los bosques evaluados en la Región Puno presentan un patrón muy distinto en relación a la composición de artrópodos reportados hasta el momento, debido posiblemente a las diferencias

Tabla 3. Registro de artrópodos encontrados en bosques de *Polylepis* de la Región Puno.

Orden	Familia	Bellavista	Chingo	Lawa Lawani	Quilcapunku	Torno
Acari	Acari	2	19	5	5	2
Araneae	Salticidae	17	15	6	8	23
	Lycosidae	25	5	1	2	26
	Nd	84			1	
	Teraphosidae	1	3	14	6	
Chilopoda	Chilopoda		3		1	
	Scolopendridae					1
Coleoptera	Bostrichidae	3			9	
	Buprestoideo					1
	Carabidae	4			2	26
	Cerathocantidae					1
	Chrysomelidae	2			11	1
	Coccinellidae		2	15		4
	Crysolmelidae	1			1	5
	Curculionidae	26	4		10	26
	Heteroceridae					1
	Hidrophylidae	1				
	Histeridae	2			2	
	Ptilidae			1		
	Sciaridae				1	
	Scolytidae				3	1
	Staphylinidae	78	1	1	9	3
Tenebrionidae				23	1	
S/d				2		
Collembola	Entomobryidae	277	211	144	36	9
	Isotomidae	13	158			11
	Poduridae	50		2	3	493
	Smythuridae	26	66	79	1	7
Dermaptera	Forficulidae		7			
Diplopoda	Diplopoda		1			
Diplura	Diplura		1			
Diptera	Agromyzidae	12		4	41	6
	Anthomidae	13		2	3	6
	Asilidae	2		1	7	8
	Bibionidae	1		2		
	Calliphoridae	14	1		30	6
	Chironomidae	80	101	25	31	37
	Chloropidae				6	
	Dolichopodidae	12	13	11	4	27
	Drosophilidae	1				3
	Muscidae	33	23	6	33	24
	Mycetophilidae		2	8		
	Otitidae		1		1	
	Phoridae	28	130	237	22	4
Psychodidae			1			

Orden	Familia	Bellavista	Chingo	Lawa Lawani	Quilcapunku	Torno
	Sciaridae	28	27	27	53	19
	Simuliidae	24	4	8		1
	Sphaeroceridae			1		5
	Syrphidae	4		2	2	1
	Tachinidae	34	20	17	49	29
	Tipulidae	8	3			
Hemiptera	Miridae	20	7	4	5	7
Homoptera	Aleurodidae			1		
	Aphidae		4	1		
	Aphididae	3			3	4
	Cicadellidae	36	13	5	50	36
	Pseudococcidae		1		2	1
	Psyllidae	1			2	6
Hymenoptera	Ammophyla					1
	Apidae				1	1
	Apoideo	1				
	Braconidae				1	2
	Chalcididae	7	3	4	3	3
	Crabronidae	3				
	Cynipidae			1	1	
	Diapriidae					1
	Drynidae	5	6			
	Eulophidae	5	1	1	1	
	Formicidae	162			495	2590
	Ichneumonidae	1	6	3	1	1
	Pteromalidae	4		1		2
	S/d	1				3
Lepidoptera	Geometridae		6	8		
	Noctuidae			1	1	
	s/d	3	12	4	3	
Neuroptera	Hemerobiidae		1			
Opilioni	Opilioniidae	6	5	11		12
Pseudoescorpion	Pseudoescorpion				2	1
Psocoptera	Psocidae	1	4		1	
Solifugae	Solifugo				2	11
Thysanoptera	Phlaeothripidae		1		1	
Trichoptera	Limnephilidae		4		1	

medioambientales, grado de alteración y perturbación respecto a otros. En el caso de Puno hablamos de un tipo de bosque más seco de los que normalmente se encuentran en Ancash. Estas diferencias conllevan a los ya mencionados cambios en la estructura de la entomofauna, siendo los grupos determinantes Diptera, Coleoptera e Hymenoptera, resaltando la presencia de la familia Formicidae (hormigas) que no ha sido registrada en las prospecciones realizadas anteriormente (Figura 6).

Análisis de Diversidad

El tratamiento estadístico está basado en el conteo de individuos por orden y familia (jerarquía

taxonómica). Para su realización se utilizó el paquete estadístico PAST.

El bosque de Bellavista es considerado como el más diverso en cuanto a órdenes de artrópodos, incluyendo Araneae y Chilopoda (Tabla 4 y Figura 6). Este bosque presenta características en composición y estructura de artrópodos que lo ubican como un bosque intermedio entre los bosques medianamente conservados y húmedos de Chingo y Lawa Lawani y los bosques extremadamente secos y altamente perturbados de Torno y Quilcapunku.

Esto es observado más claramente mediante el índice de Similitud de Morisita y representado

gráficamente mediante un cladograma (Tabla 5 y Figura 7).

En base a los análisis realizados, se puede determinar que los grupos funcionales que juegan un papel importante dentro de la estructura y composición

de artrópodos en los bosques de *Polylepis* estudiados son Diptera e Hymenoptera (Formicidae) y en menor proporción Coleoptera y Lepidoptera, cuyas poblaciones se ven afectadas de acuerdo al grado de alteración al que han sido sometidos los bosques.

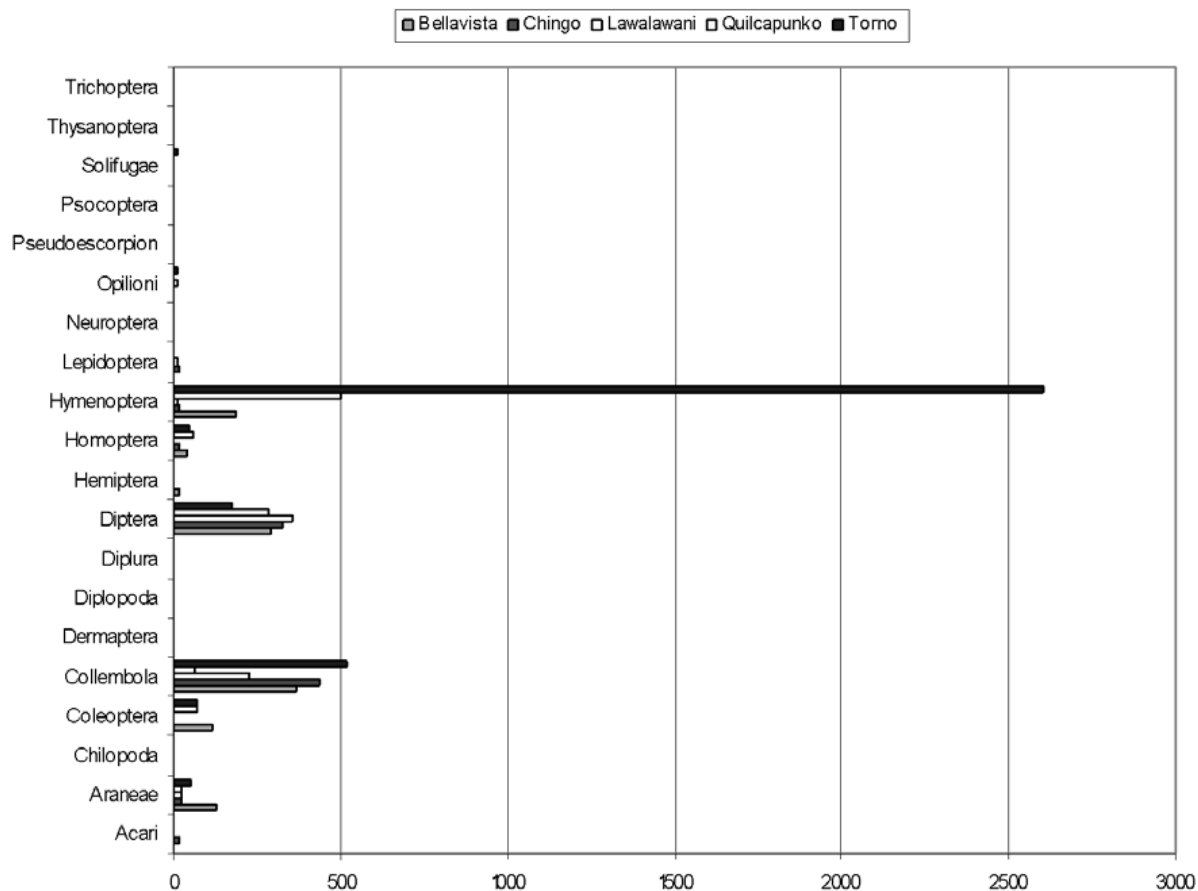


Figura 6. Esquema de presencia y abundancia de los diferentes órdenes de artrópodos registrados para bosques de *Polylepis* de la Región Puno.

Tabla 4. Diversidad de órdenes por bosque de *Polylepis* de la Región Puno con índices de Shannon (H) y Simpson (D).

	TaxaS	Individuals	DominanceD	H	D
Bellavista	11	1168	0.2113	1.731	0.7887
Chingo	18	896	0.3698	1.368	0.6302
Lawa Lawani	10	655	0.4123	1.174	0.5877
Quilcapunku	15	1026	0.3289	1.441	0.6711
Torno	12	3501	0.5782	0.9105	0.4218

Tabla 5. Índice de Similitud de Morisita para órdenes en los bosques evaluados en la Región Puno.

	Bellavista	Chingo	Lawa Lawani	Quilcapunku	Torno
Bellavista	1	0.8639	0.80524	0.66589	0.46517
Chingo		1	0.93311	0.40428	0.22045
Lawa Lawani			1	0.48497	0.18249
Quilcapunku				1	0.85992
Torno					1

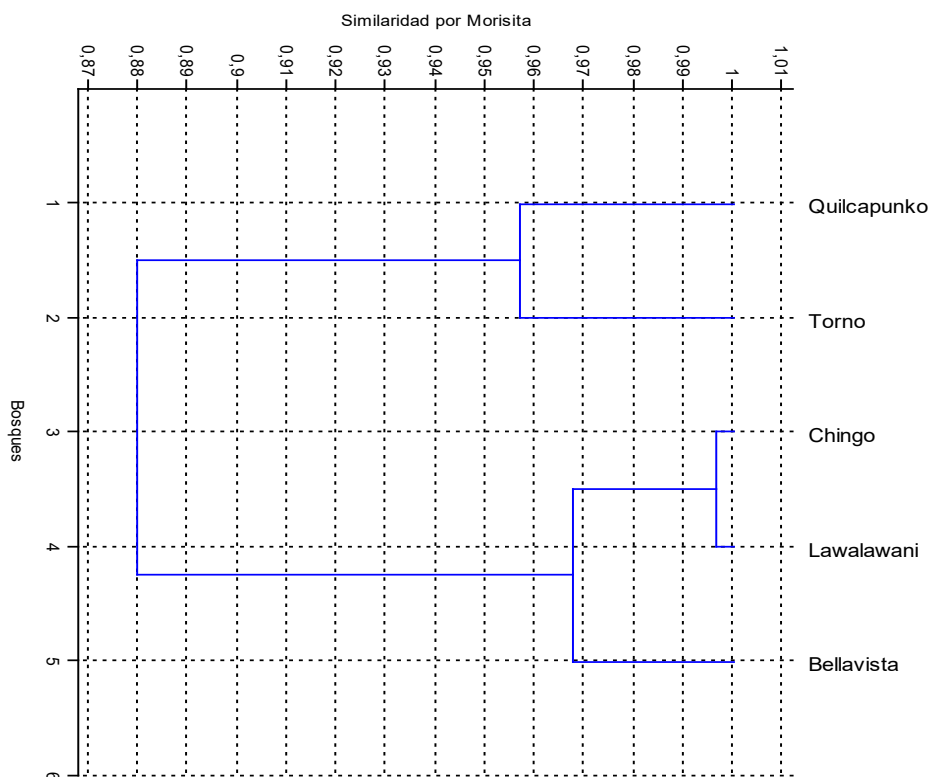


Figura 7. Cladograma de similitud por órdenes entre bosques de *Polylepis* evaluados en la Región Puno.

A elevaciones altas, los dípteros constituyen una proporción muy alta de la fauna, tanto en especies como en individuos. En los bosques de *Polylepis* en la Región Puno, se puede observar que la composición de familias registra un cambio notorio respecto a los bosques húmedos y moderadamente impactados, no sólo por cambios en la abundancia, sino en la composición misma de este grupo. En tal sentido, estos se constituyen como buenos indicadores de grados de alteración de estos bosques (Figuras 8 y 9).

Para el caso de Coleoptera, contrariamente, los cambios en composición no parecen estar relacionados en función a grados de alteración, pero sí en función del tamaño del fragmento de bosque (área) y disponibilidad de alimento, con el notable incremento en el número de ejemplares de Coleoptera predadores (Staphylinidae) (Figuras 10 y 11).

Efecto de la Exposición sobre la Composición de los Insectos

Se puede observar un cambio en la composición de la entomofauna debido a la exposición diferencial que existe en las zonas dentro de cada parche de estudio. Es así que se presenta una mayor diversidad en áreas sometidas a una exposición del tipo 0 (de mayor exposición), dentro y fuera del bosque, esto motivado posiblemente a que estas zonas presentan

mejores condiciones para los taxones hallados, como intensidad de luz y alimento. (Tabla 6). Este último factor se puede explicar por la presencia de herbáceas colonizadoras como consecuencia de la apertura (tala de bosque) para áreas de cultivo y otras actividades. Las plantas herbáceas presentan flores de colores variados que atraen a los diferentes tipos de dípteros encontrados, explicando así su abundancia y diversidad, así como los diferentes fitófagos colectados (Cicadellidae: Hemiptera).

En otros grupos, como los analizados a continuación, se puede notar una respuesta diferente a la exposición motivada principalmente por las condiciones como son el tipo de flora y el tipo de suelo (Figura 12). En el caso de los herbívoros (Cicadellidae: Homoptera), estos se ubican mayormente en las zonas con exposición 0 y 1, caracterizadas por presencia de poáceas, *Lachemilla*, *Gentiana*, *Guarneria*, *Bacharis* y *Satureja*.

Grupos como Entomobryidae (Collembola), contrariamente a lo esperado, son más abundantes en las zonas con alta exposición. Esto se explica por la presencia de poáceas en las partes más expuestas, las cuales actúan como reservorios de humedad proveniente del rocío matinal, que provee las mejores condiciones para el desarrollo de este grupo de características mayormente hidrófilas.

Hemiptera y Coleoptera (Carabidae y Staphylinidae) presentan tendencias parecidas en su composición a nivel de los transectos. Son más abundantes en las zonas de exposición 0 y 1, motivados, al igual que en el caso de las arañas, por condiciones de alimentación.

Los bosques de *Polylepis* estudiados en la Región Puno presentan diferencias en cuanto a composición de insectos respecto a bosques de *Polylepis* de la

región Ancash (Oroz-Ramos et al., 2017), diferencia marcada principalmente por la presencia de Formicidae y casi la total ausencia de Geométridae en los bosques de Puno.

Los análisis de diversidad de insectos muestran que bosques medianamente conservados y semihúmedos presentan un índice de diversidad menor respecto a bosques secos y fuertemente alterados. De igual manera, dentro de un mismo parche, áreas expuestas

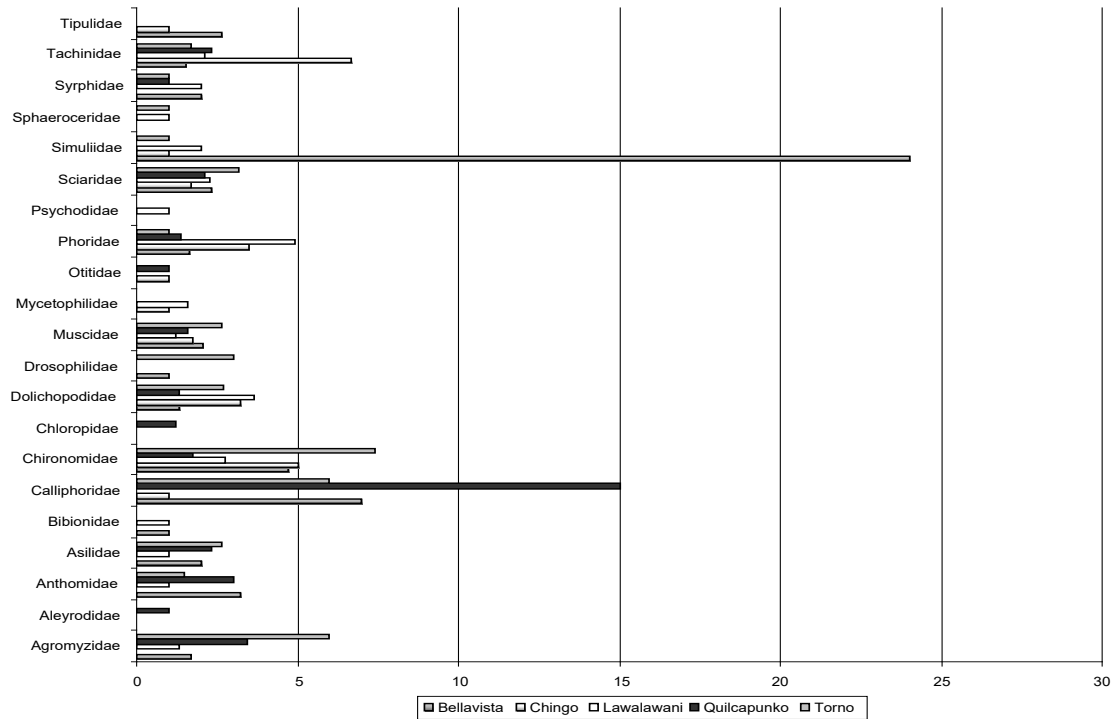


Figura 8. Composición de familias de Diptera presentes en bosques de *Polylepis* en la Región Puno.

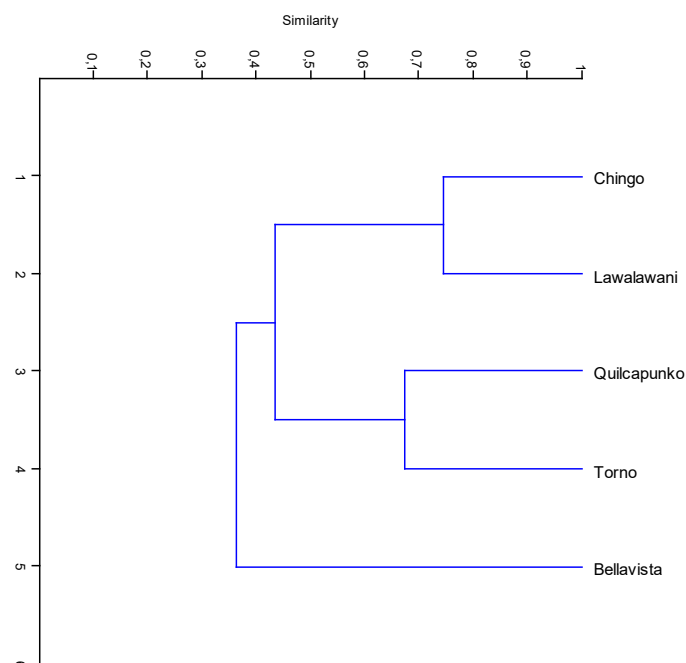


Figura 9. Análisis de conglomerados para familias de Diptera en bosques de *Polylepis* en la Región Puno.

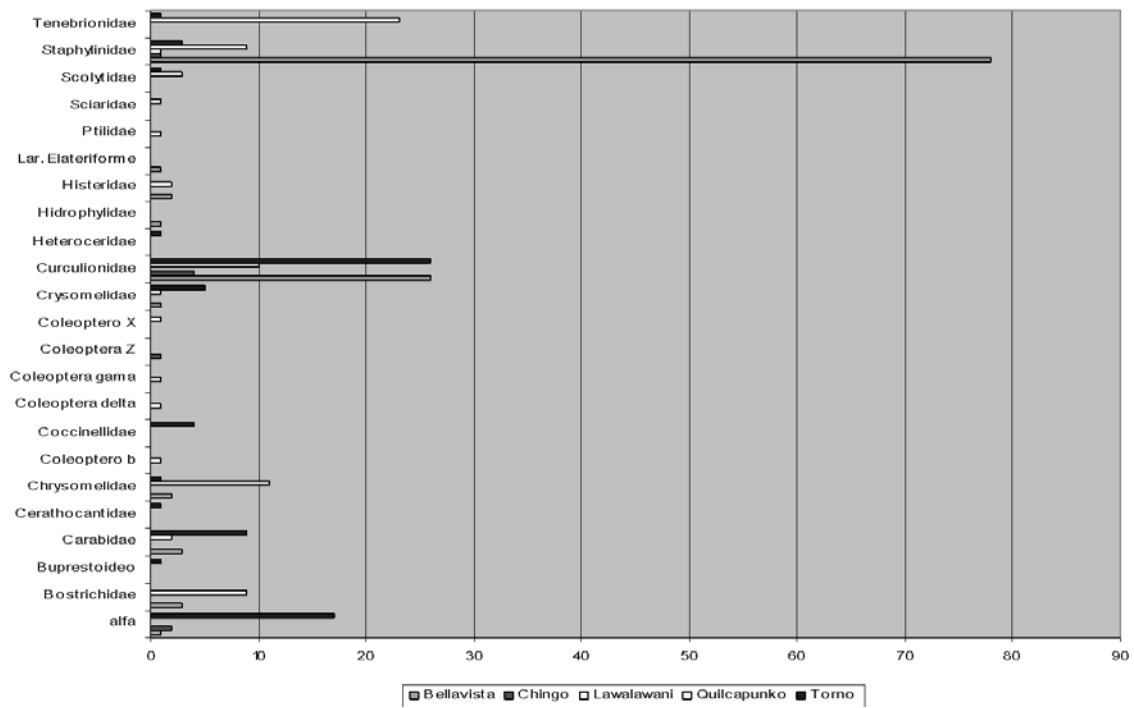


Figura 10. Composición de familias de Coleoptera presentes en bosques de *Polylepis* en la Región Puno.

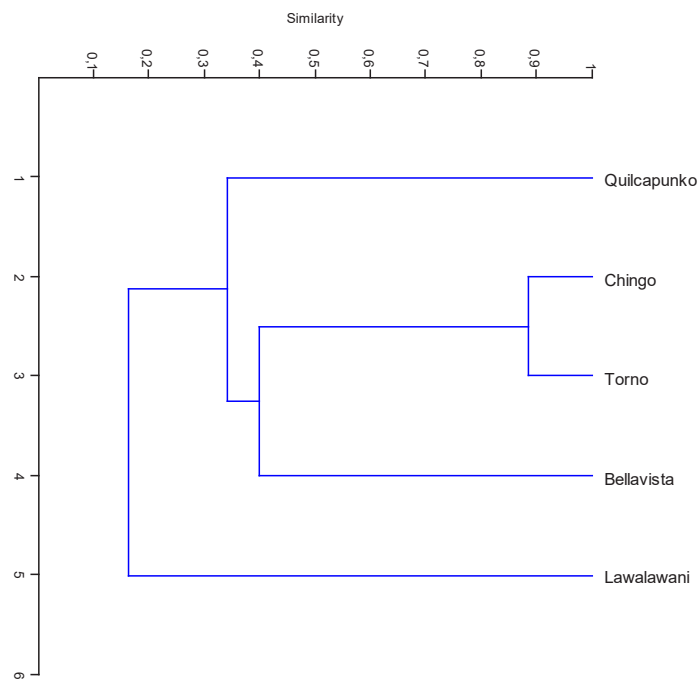


Figura 11. Análisis de conglomerados para familias de Coleoptera registrados en bosques de *Polylepis* en la Región Puno.

Tabla 6. Diversidad de órdenes de artrópodos de acuerdo al grado de exposición.

	Taxa S	Individuals	Dominance D	Shannon H	Simpson 1-D
Exp. 0	85	2098	0.09678	2.963	0.9032
Exp. 1	68	2177	0.3803	1.898	0.6197
Exp. 2	51	995	0.2731	1.909	0.7269
Exp. 3	49	945	0.4154	1.828	0.5846

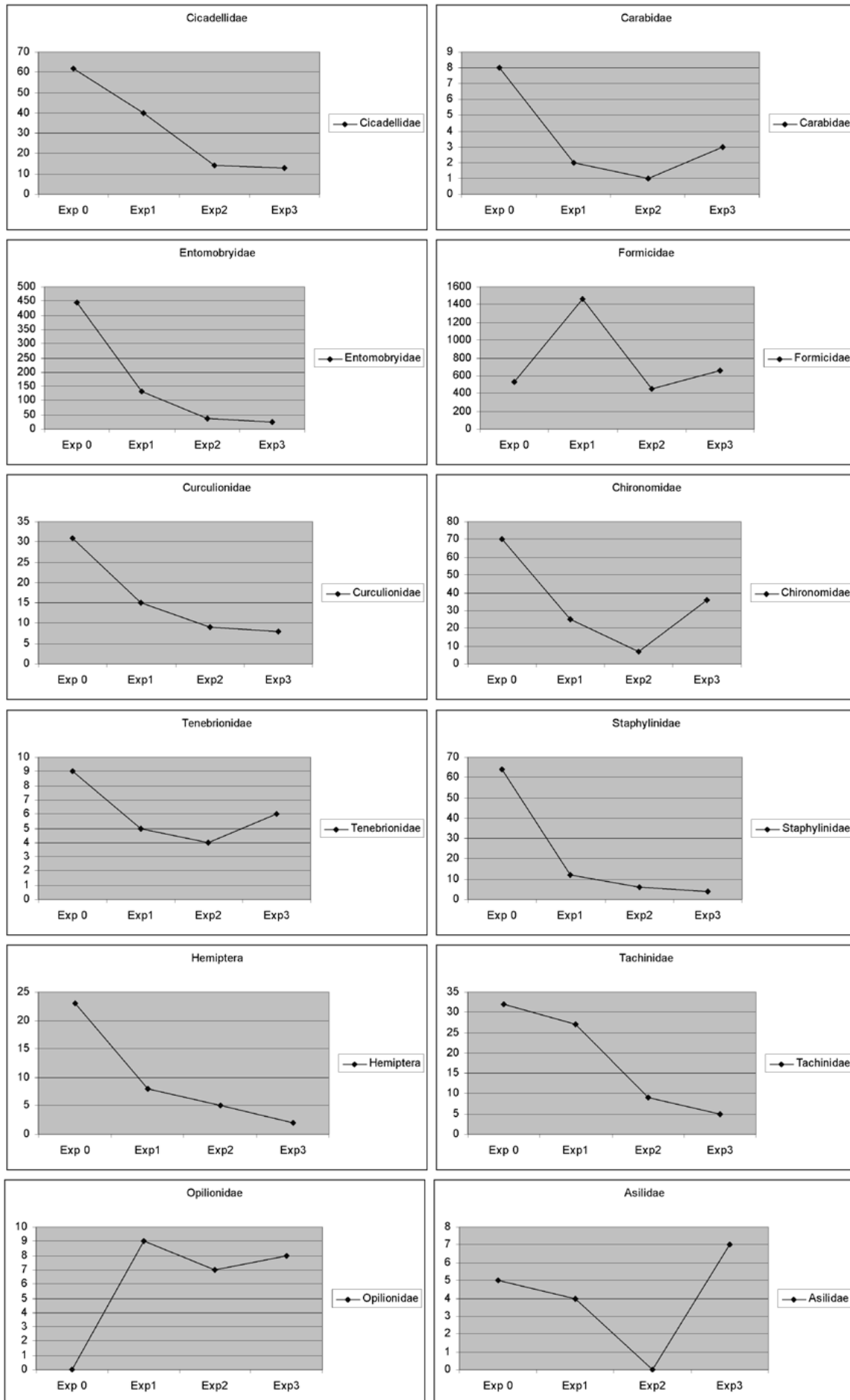


Figura 12. Composición de diferentes familias según el grado de exposición.

con cobertura vegetal compuesta principalmente por poáceas, *Lachemilla* y *Gentiana* presentan una mayor diversidad de insectos respecto a áreas menos expuestas, con cobertura de musgo u hojarasca.

Los grupos funcionales que determinan las diferencias en cuanto a diversidad de insectos en los bosques de *Polylepis* en la Región Puno son principalmente representantes del orden Diptera, predadores y parasitoides, (Tachinidae, Asilidae, Muscidae y Calliphoridae) y Coleoptera con presencia de familias propias de áreas secas (Tenebrionidae) e incremento en número de especies predatoras (Staphylinidae).

Agradecimientos

Agradecemos a la Asociación Ecosistemas Andinos ECOAN y a Conservación Internacional Perú por la utilización de los datos del proyecto “Evaluación de la Biodiversidad en Bosques de *Polylepis* de la Región Puno”.

Referencias

Didham, R. K. (2002). The influence of edge effects and forest fragmentation of leaf litter invertebrates in central Amazonia. En Laurance, W. F. y Bierregaard, R. O., Jr. (Eds.). *Tropical forest remnants: Ecology, management, and conservation of fragmented communities*, 55-70.

Fernández, H. R. y Domínguez, E. (Eds.). (2001). *Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos sudamericanos*. Tucumán, Argentina, Universidad Nacional de Tucumán.

Fjeldså, J. y Kessler, M. (1996). *Conserving the biological diversity of Polylepis woodlands of the highland of Peru and Bolivia: A contribution to sustainable natural resource management in the Andes*. Copenhagen, NORDECO.

Hjarsen, T. (1997). *The effects of plantations in the Andes*. Tropical Forest Update, 7, 15.

Oroz-Ramos, A. J., Bustamante-Navarrete, A. A., Farfán-Flores J. y Santander-Azpilcueta O. J. (2017). Artrópodo-fauna de los bosques de *Polylepis* (Rosaceae) de la zona de Conchucos, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 97–112. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1162955>

Quinteros, R., Paz-Soldán, L. A., Pinto, C. F., Aguirre, L. R., Ruiz, O. y Tacachiri D. (2006). Influencia de actividades antropogénicas sobre comunidades de mariposas en bosques nativos de *Polylepis besseri* de Cochabamba - Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 20, 43-64.

Rossi, C., Galindo, I., Huaman, G., Cuadros, B., Ortega, Y., Quispitupac, E. y Martínez, N. (2018). Primer estudio de la riqueza de coleópteros en un bosque de *Polylepis tomentella* del distrito de Chaviña (Ayacucho, Perú). *Ecología Austral*, 28, 229-234.

Sánchez, D. (2003). *Coleópteros acuáticos y áreas prioritarias de conservación en la Región de Murcia*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Murcia. [ref: *Ecosistemas*, 12(2), mayo-agosto].

Yallico, E. (1992). *Distribución de Polylepis en el sur de Puno*. Puno, Proyecto Arbolandino.

Lineamientos Específicos para la Formulación de la Propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña del Perú

Specific Guidelines for Formulation of the Proposal for the National Policy of Glaciers and Mountain Ecosystems of Peru

Peter J. Oesterling Jr.¹

¹Especialista de Políticas Públicas Ambientales, Consultor – CARE Perú por el Convenio Específico entre el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), CARE Perú y la Universidad de Zürich

[Nota del Editor: El presente pertenece a un documento más extenso elaborado con el propósito de diseñar un Marco Institucional compuesto de lineamientos específicos para la formulación de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña en el Perú. Así el Marco Institucional señala el contexto de cómo se estructuró el presente documento y además contiene información para guiar el desarrollo de subsecuentes iteraciones de la propuesta para la Política Nacional. En tal sentido, el presente es un documento de trabajo que forma parte de un proceso mucho más complejo que todavía sigue en desarrollo. No es la versión final de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, sino un paso clave que puede servir como punto de partida para la elaboración del contenido final.]

Resumen

Los lineamientos específicos para la formulación de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña del Perú se demuestran en la forma de un marco, así como parte de un Marco Institucional del INAIGEM para el desarrollo de este tema importante. El presente documento empieza con una introducción que da el contexto inicial sobre la necesidad de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Luego se especifican los criterios necesarios provenientes del Gobierno Nacional Peruano para la elaboración de la Política. A continuación, se explica la metodología para el desarrollo de los lineamientos específicos y, más allá, del Marco Institucional mismo. Se identifican los objetivos generales para la Política y los problemas públicos a los que intentará dar solución. Finalmente, el documento introduce el contenido de los lineamientos, la manera en que fueron elaborados, una propuesta de lineamientos transversales y, finalmente, los lineamientos mismos.

Palabras clave: *Glaciares, ecosistemas de montaña, política nacional de glaciares y ecosistemas de montaña, lineamientos específicos de política, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña*

Abstract

The specific guidelines for the formulation of the proposal for the National Policy for Glaciers and Mountain Ecosystems of Peru are demonstrated as an element of an overall Institutional Framework of INAIGEM for the development of this important topic. The present document begins with an introduction that provides an initial context for the need for a National Policy for Glaciers and Mountain Ecosystems. Then it specifies the necessary criteria provided by the Peruvian national government for the elaboration of the Policy. Next, it explains the methodology for the development of the specific guidelines and, beyond that, of the entire Institutional Framework. It identifies the general objectives for the Policy and public issues that it will attempt to solve. Finally, the document introduces the content of the guidelines, the way they were elaborated, a proposal for transversal guidelines and, finally, the guidelines themselves.

Keywords: *Glaciers, mountain ecosystems, national policy on glaciers and mountain ecosystems, specific policy guidelines, National Institute for Research on Glaciers and Mountain Ecosystems*

Introducción

Los glaciares en las cordilleras peruanas están retrocediendo a un ritmo alarmante debido al cambio climático, lo que representa un desafío complejo para los diversos sectores económicos y las poblaciones humanas que dependen de sus cuencas hidrográficas. Las 18 cordilleras glaciares peruanas perdieron más de 50% de su superficie glaciar desde el año 1962, una equivalencia de agua 34 veces más que la cantidad de agua que la ciudad de Lima consume al año.^{1,2} Un enfoque más detallado de esta situación demuestra una realidad aún más grave. Ya hay cordilleras glaciares en extinción en el Perú, algunas de ellas en el sur del país han perdido más de 90% de su área glaciar en el mismo plazo.³ Este retroceso rápido es particularmente preocupante dada la distribución geográfica de la mayoría de la población y la mayor

actividad económica del Perú en la franja costera al oeste de los Andes.

La demanda del agua en las cuencas glaciares de la vertiente occidental de los Andes no es compatible con la realidad de su abastecimiento. Por ejemplo, el río Santa, el segundo río más grande de la costa del Pacífico del Perú, obtiene al menos un tercio de su flujo anual de escorrentía glaciar. Siete de las nueve cuencas hidrográficas de la Cordillera Blanca, incluyendo el Santa, ya han pasado el “pico de agua” debido a la rápida recesión glaciar.⁴ Esta demanda origina la rivalidad entre actores por los cada vez más escasos recursos hídricos. Esa demanda, junto con las quejas existentes sobre el acceso a los recursos hídricos, así como el incremento de contaminación en los ríos, trae una mayor pensión a conflictos socioambientales.

Mientras tanto, los ecosistemas de montaña del Perú son cada vez menos capaces de soportar los impactos del cambio climático debido al aumento de la deforestación, al cambio en el uso de la tierra y a la contaminación. Esto influye directamente en la capacidad de estas áreas para proporcionar servicios ecosistémicos a las poblaciones circundantes. Estos servicios incluyen mitigar la gravedad de los desastres naturales, que son cada vez más frecuentes y devastadores, como inundaciones y deslizamientos de tierra, debido en parte a la falta de suelos retentivos y de cobertura de árboles. Además, las cordilleras glaciares son aún más peligrosas que en el pasado debido al cambio climático. El colapso de la morrena terminal de una de las precarias lagunas de montaña podría suceder en cualquier momento a causa de una avalancha o un sismo.

Estos factores, y muchos más, juegan un rol exacerbante en el empeoramiento de los resultados del desarrollo humano como la pobreza, la inseguridad alimentaria, la salud, la productividad económica y la resistencia a los riesgos geológicos. Así, el Perú se enfrenta a un obstáculo multidimensional que requiere soluciones adaptativas. La gestión de este desafío exige una comprensión de los riesgos combinados con la fragilidad climática que surgen cuando el cambio climático interactúa con otras presiones sociales, económicas y ambientales.⁵ Para ello, es necesario desarrollar mecanismos de coordinación y comunicación intersectoriales a fin de gestionar los riesgos climáticos y problemas ambientales para lograr la resiliencia climática y un mejor bienestar humano que se beneficie del medio ambiente. La Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña elaborada por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) sería un paso principal para alcanzar este objetivo.

Por lo tanto, para servir como un punto de partida en la elaboración de la propuesta de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, se elaboró el presente documento que sirve como un resumen ejecutivo de un Marco Institucional, mediante el desarrollo del servicio de consultoría “Elaboración de los lineamientos específicos para la formulación de la propuesta de Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.” La consultoría se realizó en el marco de un trabajo colaborativo entre el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, la autoridad nacional en la materia, y la organización no gubernamental CARE Perú, como aliado estratégico.

El Marco Institucional debe ser utilizado complementariamente con los documentos producidos por la consultoría por el Convenio Específico entre el INAIGEM, CARE Perú y la Universidad de Zúrich, que resultó en la elaboración de:

1. Un diagnóstico en el cual se define el contexto en el cual se diseñará la Política.
2. Un mapeo de actores, así como la caracterización de usuarios de la Política.
3. Un Plan de Trabajo para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

Estos insumos, junto con los resultados obtenidos de la presente consultoría, así como la construcción de una base de datos de normatividad ambiental peruana y mecanismos de gestión existentes, el subsecuente análisis de la base de datos vinculando la normatividad y los mecanismos con los objetivos sectoriales e institucionales del INAIGEM y el Marco Institucional sirven para implementar el proyecto de desarrollo de la propuesta de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Además, el INAIGEM ya cuenta con los alcances necesarios para iniciar la búsqueda de apoyo financiero con el fin de elaborar el proyecto.

Criterios para la Elaboración de la Propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

El INAIGEM tiene que alinear el desarrollo de la propuesta para la Política Nacional con los intereses institucionales de su Consejo Directivo. Entonces hay que entender cuáles son las instituciones de donde vienen los representantes y cómo se relacionan sus intereses con los del INAIGEM para desarrollar una propuesta de la Política de manera integrada. El Consejo Directivo está conformado por las siguientes instituciones:

1. Un representante del Ministerio del Ambiente - MINAM, quien lo preside.
2. Un representante del Ministerio de Agricultura y Riego - MINAGRI.
3. Un representante del Ministerio de Cultura - MC.
4. Un representante del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET del Ministerio de Energía y Minas - MEM.
5. Un representante de la Autoridad Nacional del Agua - ANA.
6. Un representante de las universidades designado por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.⁶

Las funciones del Consejo Directivo correspondientes al enfoque de este documento son^a:

1. Proponer al MINAM la Política y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
2. Aprobar las acciones orientadas a la investigación, en concordancia con la Política y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
3. Aprobar las acciones orientadas a la implementación de la Política y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, así como realizar seguimiento a las mismas.
4. Aprobar los mecanismos de articulación intergubernamental e interinstitucional con los distintos niveles de gobierno y las entidades de la administración pública, que contribuyan al desarrollo e implementación de la Política y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

Además, hay criterios oficiales incluidos en el desarrollo de una política nacional. Principalmente, hay que lograr la aprobación del Ministerio del Ambiente debido a que el INAIGEM es un organismo adscrito al MINAM. Después de recibir su aprobación, se debe derivar la política a la Presidencia del Consejo de Ministros. La PCM tiene varios criterios para la formulación de una política nacional según el Decreto Supremo, No 029-2018-PCM. Así, la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña debe

^aPara ver todas las funciones del Consejo Directivo, refiérase al Anexo 3 de la versión completa del Marco Institucional.

^bPara ver el Decreto Supremo N° 029-2018-PCM en su totalidad, que el INAIGEM tiene que tomar en cuenta durante la elaboración de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, refiérase al Anexo 4 de la versión completa del Marco Institucional.

^cPara ver un insumo de la base legal para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, refiérase al Anexo 1 de la versión completa del Marco Institucional. En tal sentido, la base legal de la Política sería una extensión de la base legal de las funciones para el INAIGEM.

^dLa metodología del desarrollo del presente documento como Marco Institucional sirve como un modelo complementario para la elaboración del contenido de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

^ePara ver insumos colectivos para el diagnóstico, hay que referir al Producto 2 de la consultoría elaborado como parte del convenio específico con CARE Perú, que realizó un Diagnóstico y Mapeo de Actores. Además, la versión completa del Marco Institucional se complementa con el Diagnóstico elaborado por la consultoría referenciada.

incluir los siguientes aspectos.^b

Contenido de una Política Nacional

1. Antecedentes

2. Presentación

Resume en forma general la política nacional.

3. Base Legal

Incluye las referencias normativas nacionales, así como la de los principales instrumentos internacionales que el Estado peruano ha ratificado, según corresponda, que regulan o tienen efectos sobre la materia o materias respecto de las cuales versa la política nacional.^c

4. Metodología

Describe los aspectos metodológicos seguidos para la formulación de la política, conforme a la metodología aprobada por el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico - CEPLAN, así como aquellos aspectos específicos (bases de datos, métodos de análisis, encuestas, experiencia comparada, entre otros) que se requieran para abordar la materia objeto de la política.^d

5. Diagnóstico

Incluye la identificación de la problemática o necesidad pública de alcance nacional; la elaboración de las alternativas de solución; y, la selección de la alternativa de política más efectiva y viable. El diagnóstico debe estar sustentado en evidencia existente, tales como datos estadísticos, experiencia comparada, lecciones aprendidas, juicios de expertos, estudios e investigaciones, entre otros.^e

6. Políticas Relacionadas

Identifica la relación de políticas nacionales, detallándose el o los objetivos, lineamientos, variables,

entre otros, con los que la política nacional que se está desarrollando se vincula o enmarca.^f

7. Objetivos Prioritarios

Describe el o los objetivos de la política nacional. Responden a la problemática identificada y se formulan a nivel de resultados o impactos esperados. Guían el accionar de las entidades públicas, orientan sus recursos y se planifican en sus respectivos documentos de planeamiento.^g

Por cada objetivo se desarrolla:

- a) La situación actual. Describe el problema específico asociado al objetivo a desarrollar.^h
- b) Los responsables. Identifica a las entidades públicas involucradas en la consecución del objetivo, especificándose su responsabilidad.ⁱ

8. Lineamientos

Definen las estrategias que deben seguir las entidades públicas involucradas para alcanzar los objetivos prioritarios.^j

9. Estándares Nacionales de Cumplimiento

Se conforman por las características o atributos de los bienes o servicios que deben ser prestados por las entidades públicas.^k

10. La Provisión de Servicios que Deben Ser Alcanzados y Supervisados para Asegurar el Desarrollo Normal de las Actividades Públicas y Privadas (según corresponda)

Comprenden los servicios que deben ser prestados, identificando a sus proveedores, cobertura, alcance y facilidad de acceso.

11. Seguimiento y Evaluación

Establece al Ministerio rector o conductor responsable de recoger y sistematizar información respecto al cumplimiento de los objetivos. En el caso de una política nacional multisectorial, el Ministerio conductor coordina con los otros ministerios el cumplimiento de sus objetivos, en el marco de sus competencias y funciones sin requerir la conformación de una comisión.

12. Glosario y Acrónimos (según corresponda)

- a. Incluye un glosario de los términos usados en la política nacional que requieran una definición para su mejor comprensión.
- b. Incluye la relación de los acrónimos usados en el texto de la política nacional.

13. Anexo(s) (según corresponda)

La política nacional podrá contener anexos que detallen aquellos aspectos que se consideren relevantes.

^fPara ver insumos colectivos de Políticas Relacionadas, refiérase al Producto 2 de la consultoría por el convenio específico con CARE Perú que elaboró un Diagnóstico y Mapeo de Actores. También se debe utilizar la herramienta Excel en forma de la base de datos de normatividad ambiental y mecanismos de gestión existentes con el análisis vinculando los lineamientos, artículos, objetivos, etc. de otras entidades y normas a los objetivos sectoriales e institucionales del INAI GEM. Los objetivos sectoriales e institucionales fueron utilizados para elaborar los ejes de política del Marco Institucional. Además, en la versión completa del Marco Institucional se demuestra la normatividad y los mecanismos de gestión que se vinculan a los ejes y lineamientos elaborados del presente documento para asegurar que la elaboración de la propuesta para la Política sea de manera integrada con las metas del INAI GEM y del estado peruano. Esto es necesario para asegurar que la política se alinee con las políticas existentes en el Perú y sea útil para la implementación de intervenciones ambientales y el desarrollo. Adicionalmente, se puede referir a la sección con normatividad y mecanismos de gestión de la versión completa del Marco Institucional que debe articularse a la política.

^gLos objetivos elaborados del Marco Institucional sirven como insumos para la elaboración de los objetivos de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Se tiene que robustecer los objetivos presentados con evidencia técnica del INAI GEM y otras entidades involucradas.

^hSe debe detallar esto con información técnica basada en rigor técnico por investigación aplicada por parte del INAI GEM y otras instituciones involucradas utilizando los insumos del Marco Institucional.

ⁱPara ver unos insumos de identificar las entidades responsables relacionados a los objetivos, refiérase al Producto 2 de la consultoría por el convenio específico con CARE Perú que elaboró un Diagnóstico y Mapeo de Actores. Además, en la versión completa del Marco Institucional se presentan las entidades (y su normatividad y mecanismos de gestión) que se vinculan a los ejes y lineamientos elaborados del presente documento.

^jLos lineamientos específicos del Marco Institucional sirven como insumos en el desarrollo de los lineamientos para la elaboración de la propuesta de Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

^kEl INAI GEM tendría que establecer los estándares nacionales de cumplimiento basados en rigor técnico por investigación aplicada, junto con el Ministerio del Ambiente, la Autoridad Nacional del Agua y otras instituciones involucradas.

14. Bibliografía

Comprende la relación de documentación bibliográfica que se ha usado para formular la política nacional. La política nacional debe ser redactada con enfoque de género e interculturalidad, según corresponda.⁸

Además, un criterio importante es que la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña deberá estar alineada con los objetivos ambientales y de desarrollo del Estado, así como con acuerdos internacionales en la materia. Otro criterio en la formulación de la política es que esta sea representativa e inclusiva para el estado peruano con una visión al futuro, tomando en consideración la diversidad de intereses existentes en relación con los glaciares y ecosistemas de montaña, dando cuenta específicamente de grupos sociales altamente vulnerables. En tal sentido, la Política y su elaboración deben reflejar transparencia, participación, integración, justicia, descentralización, y sostenibilidad.

En tal sentido, el Marco Institucional y los lineamientos específicos de política contenidos intentan a orientar la elaboración de la propuesta de Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. El Marco Institucional y los resultados anteriores de la base de datos de normatividad ambiental peruana, junto con su análisis de la relación de esa normatividad y mecanismos de gestión a los objetivos sectoriales e institucionales del INAIGEM de la presente consultoría, sirven como punto de partida para construir una base analítica, técnica, y cualitativa para el desarrollo de la Política. También intenta servir como guía para sustentar la implementación del plan de trabajo finalizado y los otros insumos realizados por la anterior consultoría del convenio específico con CARE Perú.

Metodología para el Desarrollo del Marco Institucional

El Marco Institucional se presenta en forma de un borrador con formato de una estructura propuesta de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña parecida a otras políticas nacionales como, por ejemplo, la Política Nacional del Ambiente. Contiene ejes de política generales, derivados de los objetivos institucionales y sectoriales del INAIGEM. Dentro de cada eje, se

tiene objetivos generales de política correspondientes al tema del eje. Al final, se ven lineamientos de política correspondientes a cada objetivo de política.

Según el Artículo 11, línea 11.1 del Decreto Supremo N° 029-2018-PCM, “Las políticas nacionales desarrollan sus objetivos a través de metas, indicadores y responsables en los respectivos planes estratégicos sectoriales multianuales-PESEM, planes estratégicos multisectoriales, planes estratégicos institucionales y planes operativos institucionales de los Ministerios y sus organismos públicos, según corresponda, en el marco del Sistema Nacional de Planeamiento Estratégico - SINAPLAN.”⁹

En tal sentido, para desarrollar los ejes de política, se utilizó el *Plan Estratégico Institucional 2017-2019* del INAIGEM, específicamente los objetivos sectoriales, asignados por el Ministerio del Ambiente, y los objetivos institucionales del INAIGEM. Los objetivos sectoriales fueron derivados¹ por la “Articulación de los Indicadores de los OES e Indicadores de las AES del PESEM con las Entidades,” que define cuáles entidades participan en cada objetivo. Los objetivos que incluyen la participación del INAIGEM son:

- OES 2: Promover la sostenibilidad en el uso de la diversidad biológica y de los servicios ecosistémicos como activos de desarrollo del país.
- OES 3: Fortalecer la capacidad de adaptación y respuesta de la población, agentes económicos y el Estado ante los efectos adversos del cambio climático, eventos geológicos y glaciológicos.
- OES 5: Fortalecer la conciencia, cultura y gobernanza ambiental.¹⁰

Además, los objetivos institucionales del INAIGEM incluidos en los ejes son:

- OEI 1: Incrementar la capacidad adaptativa ante riesgos de origen climático, geológico y glaciológico de las subcuencas glaciares priorizadas.
- OEI 2: Promover la sostenibilidad de los ecosistemas de montaña priorizando las subcuencas glaciares.
- OEI 3: Contribuir a la mejora de la oferta y calidad del recurso hídrico de las subcuencas glaciares priorizadas.¹¹

¹“La Ruta Estratégica del Sector Ambiental” incluye al INAIGEM en el OES 4, pero no en la “Articulación de los indicadores de los OES e Indicadores de las AES del PESEM con las Entidades.” Entonces, se utilizó la Articulación de Indicadores porque OES 4, que es “Promover la ecoeficiencia y la baja emisión de GEI en la economía del país” se incluye transversalmente por los otros objetivos sectoriales e institucionales, específicamente por objetivos de adaptación al cambio climático y sostenibilidad de los ecosistemas, que implicaría la conservación y reforestación de los bosques, restauración de los ecosistemas que guardan fuentes de carbón, etc.

La utilización de los objetivos sectoriales e institucionales resultó en los siguientes ejes de política temáticos, para que la propuesta de la política sea basada en las metas del INAIGEM y también del estado peruano:

- Basado en OEI 3, Eje de Política 1: Gestión y Conservación de los Glaciares y los Recursos Hídricos Alto-Andinos.
- Basado en OEI 2 y OES 2, Eje de Política 2: Recuperación y Sostenibilidad de los Ecosistemas de Montaña.
- Basado en OEI 1 y OES 3, Eje de Política 3: Capacidad Adaptativa ante los Riesgos de origen Climático, Geológico y Glaciológico.
- Basado en OES 5, Eje de Política 4: Institucionalidad, Conocimiento, y Cultura Socioambiental Andina.

Para el desarrollo de los insumos para los lineamientos específicos, se elaboró una fase cualitativa que comprende entrevistas a las Direcciones de Línea y la Presidencia Ejecutiva del INAIGEM sobre sus perspectivas y recomendaciones expertas en temas a considerar en la propuesta de Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, que incluyen la identificación de problemas, sus soluciones y potencialidades. Estas entrevistas son la base del desarrollo de los lineamientos del Marco Institucional. Para complementar el contenido generado por las entrevistas del liderazgo del INAIGEM, se elaboraron entrevistas de otras autoridades sectoriales, funcionarios del sector ONG y de la comunidad académica en temas de glaciares y ecosistemas de montaña.

Las entrevistas incluidas para el desarrollo de los lineamientos específicos del Marco Institucional son de los siguientes funcionarios^{m,n}:

- Ing. Benjamín Morales del INAIGEM, Presidente Ejecutivo (hasta 22-07-18) – 04/12/17
- Ing. David Ocaña del INAIGEM, Director de la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (hasta 30-11-18) – 06/12/17
- Ing. Ricardo Villanueva del INAIGEM, Director de la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento (hasta 21-12-18) – 09/02/18
- Ing. Ricardo Jesús Gómez* del INAIGEM, Director de la Dirección de Investigación en Glaciares, (*al tiempo de su entrevista era Jefe del Parque Nacional

Huascarán-SERNANP) – 28/11/17

- Karen Price Ríos de CARE Perú, Coordinadora Nacional del Proyecto Glaciares+, Programa de Cambio Climático – 23/04/18
- Fiorella Miñan Bartra de CARE Perú, Especialista de Proyectos de Proyecto Glaciares+, Programa de Cambio Climático – 29/11/17
- Dr. Dirk Ten Brink de USAID Perú, Jefe del Programa de Adaptación al Clima y Recursos Hídricos – 30/11/17
- Dr. Jorge Recharte del Instituto de Montaña, Director del Programa Andino – 01/12/17
- Dr. Javier Ñaupari de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Director de la Oficina de Gestión Interinstitucional y Asuntos Globales – 12/12/17
- Ing. Nelson Santillán de la ANA y el Consejo Directivo del INAIGEM, Responsable de Glaciares y Lagunas, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos – 14/12/17
- Ing. Hugo Carrillo del SERFOR-MINAGRI y el Consejo Directivo del INAIGEM, Administrador Técnico de la ATFFS Áncash – 19/03/18
- Dr. Giancarlo Marcone Flores del Ministerio de Cultura y el Consejo Directivo del INAIGEM, Coordinador General Proyecto Qhapaq Ñan – 19/04/18
- Cristina Rodríguez Valladares del Ministerio del Ambiente, Directora de Adaptación al Cambio Climático y Desertificación, Dirección General de Cambio Climático y Desertificación – 30/04/18
- Giovanna Egas Tapia del Ministerio del Ambiente, Especialista en Gestión de Riesgos Climáticos a nivel subnacional, Dirección General de Cambio Climático y Desertificación, Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Desertificación – 30/04/18
- José Carranza Hurtado del Ministerio del Ambiente, Especialista en Gestión Integrada de Cuencas, Dirección General de Cambio Climático y Desertificación, Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Desertificación – 30/04/18

Para analizar las entrevistas en mayor detalle, se elaboraron transcripciones de ellas, notando puntos importantes para incluir en la construcción de los lineamientos específicos. Después del análisis de las entrevistas, se utilizaron los resultados con el fin de diseñar redacciones de los lineamientos específicos para la elaboración del Marco Institucional.

^mSe intentó reunir con todos los funcionarios del Consejo Directivo del INAIGEM, pero no respondió el miembro del INGEMMET, y el miembro del SUNEDU no estaba instalado durante la fase cualitativa de elaborar las entrevistas.

ⁿDesde la elaboración del presente documento el liderazgo del INAIGEM ha cambiado. La nueva Presidente Ejecutiva es la Dra. Gisella Orjeda. Además, está en proceso el cambiar en el liderazgo de unas direcciones de línea.

Se elaboraron los lineamientos mediante un proceso de pasos. Primeramente, se desarrollaron lineamientos básicos iniciales para servir como una base en el diseño de los lineamientos del Marco Institucional. Los lineamientos iniciales fueron adaptados con los puntos derivados de las entrevistas. Así, se analizó entrevista por entrevista y luego de este proceso se obtuvo una nueva versión de los lineamientos en función a cada entrevista revisada.

Para complementar y sustentar los resultados de las entrevistas, se elaboró otra fase cualitativa de obtención de encuestas participativas del público alrededor de Huaraz sobre las preocupaciones de la gente en relación a los problemas asociados a los glaciares y ecosistemas de montaña. Se hicieron las encuestas durante talleres de capacitación en la comunidad de Coyllur el 19 de noviembre y en la comunidad de Unchus el 26 de noviembre del año 2017. Había 47 participantes en total. Se elaboró la codificación de los resultados de las encuestas para sustentar los resultados de las entrevistas en el desarrollo de los lineamientos del Marco Institucional, así como se consideraron los resultados de las encuestas participativas para nutrir los lineamientos obtenidos a partir de las entrevistas. Además, se incluyó un análisis de los resultados de las encuestas para demostrar sus vínculos con los lineamientos.

Con la redacción de los lineamientos que contenía los insumos de las entrevistas y encuestas, se elaboró un análisis técnico de los vínculos identificados en el análisis de la base de datos elaborada de la presente consultoría con los ejes y lineamientos, destacando cuáles instituciones están involucradas y el número de vínculos que se relaciona a los ejes y lineamientos en el desarrollo del Marco Institucional. Se revisaron los lineamientos del documento, tomando en cuenta específicamente las leyes claves que determinan el ámbito normativo de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, como la Ley de Recursos Hídricos y la Ley Marco del Cambio Climático por ejemplo, para asegurar que los lineamientos sean coherentes con esta normatividad y además con otros mecanismos de gestión de los glaciares y ecosistemas de montaña.⁹

Al final, se elaboró el Marco Institucional utilizando todos los insumos anteriores de los resultados de las entrevistas de expertos, encuestas participativas, y los resultados del análisis de políticas ambientales peruanas a

fin de diseñar recomendaciones para la elaboración de la propuesta de Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, así como lineamientos específicos finales para ella.

Objetivos Generales de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Con el fin de establecer objetivos prioritarios según el Decreto Supremo N° 029-2018-PCM, también hay que tener objetivos generales que orienten el desarrollo de la propuesta para la Política. Según el Ing. Benjamín Morales Arnao, Presidente Ejecutivo (hasta 22-07-18) del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña tiene los objetivos de:

1. “Es un documento orientador, que nos va a servir, no solo al INAIGEM, sino a todo el estado peruano, sobre cuál debe ser la Política Nacional...Entonces, va a definir en forma muy clara los alcances, y la orientación general de las investigaciones que deben realizarse y sobre todo, la institucionalidad...Todos los ministerios y todos los sectores deben alinearse en relación a esto.”
2. “Una política definida va a orientarnos sobre la base de un documento orientador de la ejecución de los trabajos. No quiere decir que solo INAIGEM va a hacer esos trabajos sino que sí los va a coordinar. Y los va a coordinar al nivel de instituciones públicas, privadas, y cooperación técnica. Creo que es una cosa muy importante porque la ley lo ampara y puede pedir y orientar las investigaciones que se hagan al nivel nacional.”¹²

Además, se identificaron otros objetivos gracias a la elaboración de la presente consultoría fundados en la misión del INAIGEM que sustentan la perspectiva orientadora clave del Ing. Morales, el primer Presidente Ejecutivo del INAIGEM. Estos objetivos incluyen, pero no son limitados, a:

1. Aumentar la integración de las instituciones gubernamentales en todos los niveles, la sociedad civil, las comunidades campesinas y la población peruana en general sobre la conservación y el aprovechamiento responsable de los glaciares, los ecosistemas de montaña y sus servicios ecosistémicos.

⁹Refiérase a los análisis de articulación, transversalidad, complementariedad y cumplimiento de la versión completa del Marco Institucional y los Anexos 7, 8, y 9 del mismo documento para más contenido de este tema.

2. Canalizar el Estado hacia la gestión sostenible de los glaciares y ecosistemas de montaña para dar solución a los problemas fundados en el nexo entre el desarrollo humano, el retroceso glaciar, el acceso a los recursos hídricos, los conflictos socioambientales, la gobernanza ambiental, la adaptación al cambio climático y los ecosistemas de montaña.^P
3. Contribuir al cumplimiento de los compromisos existentes de normatividad ambiental de manera transversal e integrada inclusive la Ley General del Ambiente, la Ley Marco del Cambio Climático, la Ley de Recursos Hídricos, la ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y, además, los acuerdos internacionales en los cuales el Perú participa, como el Acuerdo de París, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Convenio sobre la Diversidad Biológica.
4. Cumplir el mandato de la Ley de Creación de INAIGEM N° 30286.
5. Establecer la línea de base temática para la elaboración del Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

Temas de los Problemas Identificados por las Entrevistas

A través de las entrevistas, se identificaron numerosos problemas vinculados a los glaciares y ecosistemas de montaña pertinentes a los siguientes temas que la Política debería abordar:

Los Glaciares y Recursos Hídricos:

- El estado de los glaciares y los servicios ecosistémicos que proveen.
- La gestión de los recursos hídricos y su relación con los glaciares.
- La contaminación de los glaciares, los recursos hídricos y los ecosistemas en general.
- La contaminación de los glaciares por el carbono negro.
- La contaminación de los recursos hídricos y los ecosistemas por la minería.

- La contaminación natural de los recursos hídricos por metales pesados.
- La contaminación de las aguas residuales y residuos sólidos.

Los Ecosistemas de Montaña:

- Los patrones de deforestación y sus amenazas a los ecosistemas de montaña.
- Las cabeceras de cuenca y los bofedales.
- Los cambios de uso de suelo en general y sus efectos.
- El cambio de uso de suelo y el sobrepastoreo.
- El sobreuso de la tierra y sus efectos.
- El cambio de uso de suelo por una perspectiva geológica.
- La zonificación de la tierra.
- La pérdida de biodiversidad por el cambio de uso de suelo y la necesidad de conservar los ecosistemas mientras tener uso sostenible.
- El pago o retribución por servicios ecosistémicos.

Los Riesgos Asociados a la Seguridad Humana de Origen Climático, Glaciólogo y Geólogo:

- El nexo de las amenazas a los seres humanos influidas por el cambio climático y características geofísicas.
- Los peligros y amenazas geológicas influidas por el cambio climático que hay que gestionar por la investigación aplicada.
- La voluntad política para la gestión de riesgos.
- La falta del análisis de los riesgos ambientales en la planificación del desarrollo y articulación de instituciones.
- La percepción de los riesgos.
- El nexo del cambio climático y la inseguridad alimentaria.
- La inseguridad alimentaria, soberanía alimentaria, y diversidad de cultivos.

Resultados Socioeconómicos en Relación a los Glaciares y Ecosistemas de Montaña:

- La dependencia y demanda creciente de los recursos hídricos provenientes de las montañas que cada vez van disminuyendo.

^PQueda claro que INAIGEM no tiene la competencia para implementar soluciones directas de estos problemas de desarrollo. Sin embargo, como una institución de investigación aplicada del máximo nivel en estudios de glaciares y ecosistemas de montaña, INAIGEM puede informar las autoridades gubernamentales sobre las acciones necesarias a implementar para dar solución a problemas de desarrollo ligados a los glaciares y ecosistemas de montaña.

- Los conflictos socioambientales influidos por el retroceso glaciar y la mala gestión de los ecosistemas de montaña.
- Los ejemplos anteriores de los conflictos socioambientales.
- El abandono de las zonas de montaña por falta de suficiente economía.
- Los impactos socioeconómicos a futuro como consecuencia del cambio climático, el retroceso glaciar y el mal manejo de los ecosistemas de montaña.

El Conocimiento, la Institucionalidad y la Gobernanza de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña:

- El limitado conocimiento y la necesidad de reforzar la investigación aplicada de los glaciares y ecosistemas de montaña.
- La importancia de los ecosistemas de montaña por la perspectiva de las autoridades y la necesidad que la toma de decisiones sea basada en la investigación aplicada.
- La pérdida de conocimiento tradicional que hay que recuperar y la necesidad de conectar y colaborar con la gente tradicional andina para abordar el cambio climático en las montañas.
- La débil gestión de los ecosistemas de montaña y la falta de implementación de normatividad.
- La necesidad de gestión integrada y cooperación interinstitucional entre autoridades nacionales, regionales, locales y otras entidades.
- La necesidad de participación pública en la gestión de los ecosistemas de montaña y los recursos hídricos.

La Necesidad de Esfuerzos de Adaptación Ante el Cambio Climático en Relación a los Glaciares y Ecosistemas de Montaña:

- Sobre la severidad de la situación actual de los glaciares, los ecosistemas de montaña y el cambio climático, y la necesidad inmediata de esfuerzos de adaptación.
- La necesidad de adaptarse al cambio climático y, a la vez, de generar ingresos y economía para las comunidades vulnerables.
- Las potencialidades de beneficios como resultados de la adaptación al cambio climático para el desarrollo sostenible.

Para ver los problemas identificados de estos temas en citas notables de las entrevistas que fueron utilizados para desarrollar los lineamientos específicos

del Marco Institucional, refiérase a la sección Definición del Problema: La Necesidad de una Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña según los Funcionarios Entrevistados de la versión completa del Marco Institucional, y al Anexo 6 del mismo documento. Están organizados para desarrollar un contexto holístico para entender el ámbito de los problemas pertinentes a los glaciares y ecosistemas de montaña. Es importante resaltar que son citas destacadas, por lo tanto, hay más contenido de las entrevistas no incluido en el Marco Institucional que el que fue también utilizado para desarrollarlo.

Contenido de los Lineamientos Específicos para la Formulación de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

La Elaboración de los Lineamientos Específicos

Se elaboraron los lineamientos específicos desde la perspectiva que los lineamientos tienen que estar conceptualmente vinculados a los asuntos que el INAIGEM intenta abordar a través de su investigación aplicada. No son acciones solamente para el INAIGEM que hay que implementar específicamente, sino que son temas relacionados a las realidades de los glaciares y ecosistemas de montaña identificados por las entrevistas de esta consultoría que el país necesita solucionar conjuntamente, y el INAIGEM juega un rol clave para el éxito de ello. Además, se tomó en cuenta la necesidad de que una política aplicable tiene que ser fundada y reforzada por la investigación y experiencia de gente que son autoridades en los temas que una política intenta abordar. Por lo tanto, se elaboraron los lineamientos utilizando las perspectivas de los expertos en los temas de los glaciares y ecosistemas de montaña.

Se tomó en cuenta el ámbito de intervención del INAIGEM como un punto de referencia para el desarrollo de los lineamientos, que es 1500 msnm para arriba. Se intentó establecer un equilibrio entre los temas de la conservación y el desarrollo, notando que están intrínsecamente vinculados en una sociedad que prospere. Además, se desarrollaron los lineamientos con la meta de que sean flexibles y adaptables al futuro incierto de los glaciares y ecosistemas de montaña. Por ejemplo, se intentó diseñar los lineamientos desde la perspectiva de establecer un marco de acciones necesarias mientras los glaciares todavía existen en muchas cordilleras del país, a fin de que el país pueda prepararse para cuando los glaciares estén extinguidos en el largo plazo. Es importante notar que será necesario definir qué constituye un “glaciar” y “ecosistema de montaña” en las siguientes iteraciones de

trabajos para elaborar la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

Se construyeron los lineamientos con la intención de que los lineamientos sean transversales⁹ en este marco, así como con el resto de la normatividad ambiental y de los mecanismos de gestión existentes del país, abordando holísticamente los distintos problemas relacionados con los temas de los glaciares y ecosistemas de montaña. Los objetivos de cada eje de política se vinculan a los lineamientos por sus números correspondientes para demostrar la transversalidad dentro del marco. Entonces, los números de los objetivos se ven al lado del lineamiento correspondiente.

Los lineamientos tienen un nivel de redundancia para asegurar tanta cobertura de los problemas vinculados a los glaciares y ecosistemas de montaña como sea posible. También se intentó generar suficiente contenido para que los lineamientos puedan ser adaptados fácilmente durante las distintas fases de la elaboración de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. Se incluyó algo de detalle en los lineamientos según las entrevistas. Existe la necesidad futura en la elaboración de la Política de definir con más detalle los roles de las instituciones involucradas en su implementación y en la gestión de los glaciares y ecosistemas de montaña. La definición de estos roles estaba fuera de la capacidad del desarrollo del presente documento, pero se identificó la necesidad de definirlos a través de las entrevistas a los funcionarios. Por lo tanto, lo siguiente contiene los lineamientos específicos del Marco Institucional.

Lineamientos Transversales Propuestos para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Que los lineamientos propuestos de política sean sustentados por la investigación aplicada y viceversa. El componente de información, de ciencia, y de evidencia en la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña debería estar orientada a los objetivos de la Política.

Que los lineamientos propuestos de política sean basados en los temas de conservación y desarrollo sostenible de las zonas de montaña para aumentar el bienestar humano de las poblaciones en esas zonas y los servicios ecosistémicos que las sostienen.

Que la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña tenga una visión al futuro de anticipación a las realidades ambientales, sociales y económicas relacionadas con los glaciares y ecosistemas de montaña por el largo plazo.

Lineamientos Específicos para la Formulación de la Propuesta de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña

Eje de Política 1: Gestión y Conservación de los Glaciares y los Recursos Hídricos Altoandinos

Objetivos:

1. Mitigar las emisiones de carbono por los automóviles, la industria y la quema de material orgánico cerca de los nevados glaciares para minimizar sus tasas de retroceso.
2. Lograr mayor integración entre los actores en las cuencas con gestión efectiva y coordinada para maximizar el uso eficiente, equitativo y sostenible de los recursos hídricos para todos los usuarios con el propósito de alcanzar seguridad hídrica.
3. Proteger las zonas con nevados glaciares para conservar y prolongar sus capacidades de proveer servicios ecosistémicos.
4. Proteger y recuperar las cabeceras de cuenca de montaña para conservar y fortalecer sus capacidades de proveer servicios ecosistémicos.
5. Promover que el desarrollo económico dependiente de las cuencas glaciares y zonas de estrés hídrico refleje el abastecimiento de la cuenca.
6. Fortalecer la investigación en glaciares e hidrología andina para lograr mayor gestión del recurso hídrico y alcanzar alto conocimiento de los impactos sociales, ambientales y económicos que ocasionará el retroceso glaciar en el futuro.

Lineamientos de Política:

- (1) Implementar el monitoreo de la calidad de aire, reglamentos de control y acciones de educación para disminuir las emisiones de carbono de todas fuentes en

⁹Refiérase a los análisis de articulación, transversalidad, complementariedad y cumplimiento de la versión completa del Marco Institucional y los Anexos 7, 8, y 9 del mismo documento para más contenido de este tema.

las zonas cercanas a los nevados glaciares para mitigar la desglaciación por los impactos del carbono negro.

- (2)(5)(6) Fortalecer la gestión integrada y participativa de los recursos hídricos de manera holística, informada por la investigación aplicada y coordinada en forma correspondiente con la capacidad de carga del ecosistema y de la cuenca, al nivel de cuenca, subcuenca, y microcuenca.
- (2)(5)(6) Establecer mandatos para generar información de la hidrología de las zonas de montaña al nivel regional para la toma de decisiones de los consejos de cuenca a fin de lograr una mejor gestión integrada y coordinada de los recursos hídricos, informada por la investigación aplicada.
- (2)(5)(6) Robustecer la implementación completa de los mecanismos normativos para asegurar el acceso equitativo al recurso hídrico y su gestión eficiente en las zonas de montaña a medida que disminuyen las contribuciones de las cuencas glaciares.
- (3) Dar estatus especial de área protegida a las cordilleras con nevados glaciares debido a sus servicios ecosistémicos proveídos al bien común para asegurar el aprovechamiento responsable de esos servicios.
- (3)(4)(6) Promover el turismo ecológicamente sostenible a las zonas con nevados glaciares y ecosistemas de montaña como forma de difusión pública sobre la importancia de los glaciares y los ecosistemas asociados como fuentes claves del agua para el uso humano, y desarrollar mecanismos de reinversión de un porcentaje de los ingresos generados dirigida a la conservación a las zonas de alta montaña.
- (4) Dar estatus especial de área protegida a las cabeceras de cuenca debido a sus servicios ecosistémicos proveídos al bien común para asegurar el aprovechamiento sostenible de esos servicios.
- (4) Impulsar la recuperación de los ecosistemas de montaña donde se encuentran las cabeceras de cuenca para reforzar el abastecimiento del recurso hídrico.
- (5)(6) Fomentar el conocimiento de autoridades sobre el abastecimiento e importancia de los glaciares, las zonas periglaciares y la alta montaña como fuentes claves del agua para el bienestar humano con pronósticos futuros de su oferta hídrica para adaptar el desarrollo económico, las actividades productivas, y lograr seguridad hídrica con una vista a la realidad futura de los recursos hídricos.
- (5)(6) Establecer medidas de monitoreo y difusión pública de información sobre la hidrología andina, específicamente, la oferta hídrica de los glaciares y cuencas de alta montaña durante la época de estiaje para el reconocimiento por las autoridades, estado civil

e industria privada, impulsando acciones adaptativas y logro de desarrollo sostenible.

- (5)(6) Fortalecer la capacidad de la investigación del retroceso de los glaciares para estimar los volúmenes del agua que todavía existen, identificar las nuevas lagunas formadas por su retroceso, y determinar y valorar los impactos económicos, sociales y ambientales que ocasionará el retroceso, y que ha ocasionado en zonas con cordilleras de glaciares extinguidos.

Eje de Política 2: Recuperación y Sostenibilidad de los Ecosistemas de Montaña

Objetivos:

1. Impulsar la conservación y restauración de los bosques andinos y altoamazónicos con el incremento de la cobertura vegetal de especies nativas para fortalecer sus servicios ecosistémicos proveídos.
2. Mitigar la degradación de los ecosistemas de montaña y pérdida de la biodiversidad andina por el cambio de uso de suelo.
3. Conservar y recuperar los ecosistemas de montaña, específicamente las zonas determinadas como ecosistemas frágiles para mitigar el impacto del retroceso glaciar, la degradación ecosistémica, y fortalecer sus servicios ecosistémicos proveídos.
4. Identificar y realizar buenas prácticas, mejor zonificación ecológica y desarrollo sostenible por el uso de la tierra que se alinee con la capacidad de carga de la zona con un enfoque de los servicios ecosistémicos.
5. Asegurar mayor control de contaminación en los ecosistemas de montaña y los recursos hídricos, de cualquier fuente, natural o antrópica.
6. Fortalecer la investigación aplicada en las zonas de montaña, específicamente los ecosistemas considerados como ecosistemas frágiles y asegurar que las intervenciones de desarrollo y alternativas actividades económicas sean informadas de los resultados de esa investigación.
7. Identificar y valorar por investigación los servicios que proveen los ecosistemas de montaña para promover su conservación, uso sostenible, y abordar la pobreza multidimensional influida por problemas socioambientales.

Lineamientos de Política:

- (1)(2)(3) Impulsar la conservación y restauración de los bosques andinos y ecosistemas de montaña con especies endémicas con el enfoque de aumentar sus servicios ecosistémicos, como la gestión natural del agua, la mitigación de riesgos geológicos y climáticos, y la captación de gases de efecto invernadero.
- (1)(2)(3) Promover la conservación y restauración de los bosques altoamazónicos para aumentar la captación de gases de efecto invernadero, e intentar a mitigar los efectos del retroceso glaciar mediante el aumento de la transpiración a la atmósfera, contribuyendo a la recarga de las cuencas hidrográficas a través de la precipitación.
- (1)(2)(3) Lograr una mejor ejecución de los reglamentos normativos existentes ante la tala ilegal de los bosques andinos y altoamazónicos.
- (1)(2)(3) Impulsar acciones de conservación, recuperación y protección de la biodiversidad de flora y fauna andina como patrimonio nacional y fuentes claves de la integridad ecosistémica.
- (2)(3)(6)(7) Impulsar acciones de conservación, recuperación, y protección de los bofedales andinos para reforzar y ampliar sus servicios ecosistémicos de gestión del abastecimiento de los recursos hídricos y de sistema natural de filtración de contaminantes de fuentes naturales y antrópicas.
- (2)(3)(6)(7) Mitigar el cambio de uso de suelo sin identificar la rentabilidad en el largo plazo y los servicios proveídos de las zonas andinas con bosques, praderas, pastos, páramos y pajonales antes que hacer un cambio en esas zonas.
- (3)(5)(6)(7) Investigar, identificar, e implementar medidas de mitigación por biorremediación para abordar la liberación de minerales pesados por lixiviación como consecuencia de la desglaciación y la contaminación por fuentes de actividades antrópicas.
- (3)(6)(7) Promover la conservación, recuperación, y protección de áreas determinadas como ecosistemas frágiles de las zonas altoandinas debido a los servicios ecosistémicos que proveen.
- (3)(4)(6) Lograr la mitigación del sobrepastoreo en ecosistemas que sean determinados como ecosistemas frágiles.
- (3)(4) Promover mayor regulación del pastoreo y cantidades de ganado en zonas de áreas protegidas por los usuarios que tienen el derecho de utilizar esas áreas como zonas productivas.
- (4)(6)(7) Investigar, identificar, e implementar buenas prácticas agrícolas que se alineen con las capacidades de carga de los ecosistemas de montaña, tales como la rotación de cultivos, la implementación de sistemas agroforestales y el uso de ambas tecnologías modernas y tradicionales que sean eficientes para el aprovechamiento sostenible de la tierra, regeneración de los suelos, adaptación ante el cambio climático y logro de altos rendimientos de los cultivos.
- (4)(6)(7) Incentivar la crianza de ganado camélido, entre otros, que tengan menor impacto en el suelo y que, a la vez, creen oportunidades económicas sostenibles según los pisos ecológicos que aún sean adecuados para ese tipo de ganado tomando en cuenta los efectos del cambio climático.
- (4)(6)(7) Identificar e incentivar actividades económicas alternativas y más sostenibles para abordar el sobreuso de los ecosistemas de montaña que aumenten el bienestar humano.
- (4) Impulsar la implementación de zonificación ecológica y planificación territorial con el enfoque ecosistémico que refleje la tenencia de tierra y promueva igualdad en el acceso sostenible a la tierra en las zonas de montaña.
- (4)(6)(7) Promover mecanismos para que los estudios ambientales sean utilizados en la planificación de actividades económicas, enfocados en cómo el ecosistema pueda sosteniblemente soportar el desarrollo.
- (4)(6)(7) Investigar y fomentar la valoración de la rentabilidad de los servicios ecosistémicos de las montañas y promover oportunidades de desarrollo económico sostenible para las comunidades que viven en esas zonas.
- (4)(6)(7) Diseñar e implementar programas de retribución por servicios ecosistémicos en coordinación con las normas sociales de las comunidades involucradas, con el fin de lograr gradualmente la participación total en zonas andinas determinadas, alcanzar una mayor calidad de vida de los participantes, y asegurar el manejo sostenible de los ecosistemas de montaña.
- (5) Restringir el uso de agroquímicos en las zonas con ecosistemas de montaña para evitar la contaminación de los suelos y las cuencas altas, asegurando una mejor calidad del agua para todos los usuarios del agua en la cuenca.
- (5) Promover la formalización de la minería informal para mitigar la contaminación indiscriminada de los ecosistemas de montaña y los recursos hídricos.
- (5) Impulsar y asegurar que las autoridades necesarias implementen y ejecuten los reglamentos y mecanismos para monitorear, controlar y sancionar la contaminación minera de los ecosistemas de montaña y los recursos hídricos de cualquier fuente, formal o informal.
- (5) Fortalecer la implementación y regulación completa

de los mecanismos normativos para los estándares del tratamiento de las aguas residuales en las ciudades de montaña.

- (5) Promover acciones de mayor recolección y tratamiento de los residuos sólidos en las zonas urbanas y rurales de las montañas.
- (5) Implementar acciones de sensibilización pública sobre el daño de los residuos sólidos en los ecosistemas de montaña.

Eje de Política 3: Capacidad Adaptiva ante los Riesgos de origen Climático, Geológico y Glaciológico

Objetivos:

1. Logar mayor integración institucional sobre la gestión de riesgos entre el estado y la sociedad civil con el fin de identificar, estudiar, monitorear y capacitar a las autoridades y al público, e implementar acciones preventivas, reactivas y adaptivas ante todos los riesgos de origen climático, geológico y glaciológico al bienestar humano.
2. Investigar, desarrollar e implementar acciones para asegurar la soberanía y seguridad alimentaria de las poblaciones en la sierra ante los efectos del cambio climático.
3. Identificar y promover prácticas tradicionales en la agricultura como medidas de recuperación cultural y adaptación a los efectos del cambio climático para complementar prácticas modernas.
4. Investigar, desarrollar, e implementar acciones de adaptación para el aprovechamiento eficiente y sostenible de la oferta hídrica ante los efectos del cambio climático con el fin de lograr seguridad hídrica.
5. Abordar las condiciones de pobreza para revertir el abandono de los ecosistemas de montaña y la migración humana por los efectos del cambio climático y la degradación ambiental.

Lineamientos de Política:

- (1) Establecer mecanismos para la coordinación institucional que sea transversal, articulada e integrada para investigar, identificar y monitorear los riesgos de origen climático, geológico y glaciológico, y fomentar e implementar acciones ante estos riesgos y sus impactos potenciales.
- (1) Lograr mejor ejecución de reglamentos y mecanismos de normatividad existente para prevenir y

reaccionar a los riesgos y desastres naturales de origen climático, geológico y glaciológico.

- (1) Requerir que la toma de decisiones por las autoridades encargadas y las acciones orientadas a la gestión de riesgos de origen climático, geológico y glaciológico sean basadas en los resultados de la investigación aplicada y que las instituciones técnicas sean las entidades con la responsabilidad máxima de asesorar la implementación de soluciones a las amenazas de esos riesgos.
- (1) Lograr la implementación de sistemas de monitoreo, sensibilización y capacitación pública, sistemas de alerta temprana, obras de infraestructura preventiva, y protocolos preventivos y reactivos ante los riesgos de origen climático, geológico y glaciológico.
- (2)(3)(5) Incrementar la biodiversidad genética, aumentar el conocimiento de semillas nativas andinas, y asegurar el acceso a esas semillas para la siembra de cultivos de alta productividad según los pisos ecológicos para mejorar la resistencia alimentaria y económica de los cultivadores en las zonas de alto riesgo a los efectos del cambio climático.
- (2)(3)(5) Investigar, identificar e implementar acciones ante la inseguridad alimentaria basadas en el conocimiento tradicional agrícola, tales como la diversificación, la deshidratación y el almacenamiento de cultivos.
- (2)(3)(4)(5) Promover el uso de cultivos endémicos y otros de alta resistencia al cambio climático y las plagas según los pisos ecológicos necesarios para los propósitos de adaptación, uso eficiente del agua y resiliencia económica de comunidades y mercados locales en zonas vulnerables al estrés hídrico y pérdida de la fertilidad del suelo.
- (2)(3)(4)(5) Lograr seguridad hídrica ante el cambio climático por inversiones en acciones preventivas, reactivas y multipropósitos en forma de siembra y cosecha de agua y el riego eficiente por la implementación de infraestructura gris y verde, adaptativa e innovadora basada en el conocimiento ancestral de la sierra y la tecnología moderna por la construcción y restauración de: andenes, reservorios, microrreservorios, presas, represas multipropósitos, cochas, sistemas de irrigación eficientes, waru warus, amunas, y zanjas de infiltración.
- (4) Promover buenas prácticas del uso de agua eficiente para el consumo humano y utilización para la producción económica que refleje el abastecimiento de las cuencas para asegurar el desarrollo sostenible y seguridad hídrica ante los efectos del cambio climático.
- (5) Investigar y promover actividades económicas rentables, resistentes, y ecológicamente sostenibles

ante los efectos del cambio climático para abordar las circunstancias de la pobreza, fortalecer las cadenas de valor económico y revertir el abandono de los ecosistemas de montaña.

- (5) Desarrollar mecanismos para subsidiar actividades resistentes y ecológicamente sostenibles ante el cambio climático para generar economía en zonas de montaña altamente vulnerables al abandono de los ecosistemas por los efectos de la degradación ambiental y el cambio climático.

Eje de Política 4: Institucionalidad, Conocimiento, y Cultura Socioambiental Andina

Objetivos:

1. Asegurar que la toma de decisiones de autoridades políticas sobre asuntos ambientales, socioeconómicos y productivos en las montañas y las poblaciones dependientes de ellas sea basada y vinculante a la investigación científica y aplicada con un enfoque anticipativo a la realidad futura de los glaciares, los ecosistemas de montaña y sus servicios ecosistémicos.
2. Fortalecer la capacidad de las instituciones de supervisión ambiental para exigir el aprovechamiento responsable de los recursos naturales en los ecosistemas de montaña y ejecutar reglamentación para penalizar infracciones por contaminación.
3. Ordenar, concertar, fortalecer, financiar y articular la gestión de los glaciares y ecosistemas de montaña para lograr mayor integración entre entidades públicas con el fin de lograr una institucionalidad ambiental más efectiva y unificada.
4. Fortalecer, aumentar, y orientar la investigación aplicada, desarrollo de nuevas tecnologías, capacitación pública y educación ambiental sobre los glaciares, los ecosistemas de montaña y la gestión sostenible de sus recursos naturales.
5. Promover la recuperación cultural de saberes ancestrales, los valores del país, empoderamiento de comunidades andinas e identidad de la población.
6. Generar espacios de diálogo y participación pública y mejorar equidad y justicia social de acceso sostenible a los recursos naturales de los ecosistemas de montaña para abordar los conflictos socioambientales.

Lineamientos de Política:

- (1)(2)(3)(4) Lograr mayor voluntad política y conocimiento de las autoridades de todos los niveles del gobierno sobre la importancia y la severidad de los problemas asociados a los glaciares y ecosistemas de montaña, específicamente los vínculos de esos problemas a los resultados sociales y económicos del país.
- (1)(2)(3)(4) Impulsar que las decisiones y acciones gubernamentales de las zonas de montaña que se relacionan a asuntos ambientales y socioambientales, y la planificación de actividades del desarrollo económico sean basadas en la investigación aplicada y apuntadas a la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos y la seguridad humana asociada a los riesgos de origen climático, geológico y glaciológico para el bien común.
- (1)(2)(3)(4) Alcanzar la declaración de prioridad nacional de la inversión de fondos para la investigación y sensibilización pública sobre los glaciares y ecosistemas de montaña.
- (1)(2)(6) Incentivar la extracción minera responsable y promover diálogo para lograr mayor conocimiento ambiental de los actores mineros para mitigar el impacto ambiental del sector minero.
- (1)(2)(3) Fortalecer la implementación completa de la existente normatividad y reglamentación de los recursos hídricos y gestión de los ecosistemas de montaña.
- (2)(3) Robustecer a las entidades de reglamento y supervisión ambiental, sustentado por el apoyo técnico para llevar sus mandatos, suspender y penalizar actividades económicas productivas que causan contaminación de cualquier forma para lograr mayor protección y conservación ambiental de los ecosistemas de montaña.
- (2)(3) Lograr interinstitucionalidad ordenada, integrada, coordinada, estandarizada y transversal de las instituciones al nivel nacional, regional y local con competencias en los glaciares y ecosistemas de montaña con sus roles, funciones y ámbitos de intervención definidos para asegurar mejor gestión efectiva ambiental e implementación de acciones colectivas.
- (3)(4) Lograr mayor inversión pública y privada en la gestión sostenible, conservación, recuperación y adaptación de las zonas de montaña debido a su importancia en los resultados socioeconómicos del país.
- (3)(4)(5)(6) Generar espacios de diálogo y alcanzar mayor participación pública en las zonas de montaña en los procesos de la toma de decisiones para la gestión ambiental y del recurso hídrico de manera

colectiva e integrada para abordar la marginalización y conflictividad socioambiental de grupos vulnerables entre comunidades locales, actores económicos y autoridades gubernamentales del nivel nacional, regional y local.

- (3)(4) Generar investigación aplicada y centralizada con los resultados públicamente disponibles, y establecer acciones de capacitación pública de difusión de conocimiento por la sociedad civil, sistema académico e industria privada para abordar las brechas de información ambiental sobre los glaciares y ecosistemas de montaña y su importancia para el bienestar humano.
- (4) Desarrollar currículos académicos basados en la investigación aplicada de nivel primaria, secundaria y universitaria que incluyen la educación sobre los ecosistemas de montaña, los glaciares, las lagunas y la gestión de los recursos hídricos, además de la gestión de riesgos de desastres.
- (4) Asegurar que las investigaciones en los glaciares y ecosistemas de montaña orienten a los lineamientos definidos en la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
- (4) Requerir que las investigaciones académicas y científicas internacionales en colaboración con entidades peruanas compartan sus resultados con las necesarias instituciones para sustentar el desarrollo de actividades y aumentar la generación de conocimiento ambiental.
- (4)(5) Lograr y promover más colaboración entre la academia, firmas de tecnología, comunidades con conocimiento ancestral, entidades internacionales y las entidades del estado para fortalecer la colección y crecimiento de fuentes de datos, promover el intercambio de información, cerrar brechas de información y desarrollar acciones coordinadas de intervención ambiental.
- (5)(6) Fomentar la recuperación, capacitación y promoción del conocimiento ancestral como fortaleza en la gestión de los ecosistemas de montaña y los recursos hídricos para desarrollar soluciones ante los efectos del cambio climático y conflictividad socioambiental.
- (5)(6) Estudiar e implementar mecanismos de cooperación social inclusiva, representativa y equitativa para las comunidades campesinas que promuevan e incluyan sus normas culturales en la gestión de los recursos hídricos y ecosistemas de montaña.
- (5)(6) Implementar procesos de consulta previa que respondan a las necesidades y perspectivas de comunidades de alta montaña al nivel de mancomunidad con respeto a la implementación de proyectos de desarrollo y actividades económicas en las zonas que habitan.
- (5)(6) Asegurar que las estrategias de conservación de los glaciares y ecosistemas de montaña, el manejo de los recursos hídricos y ecosistemas y las acciones de intervención o desarrollo incorporen las prioridades establecidas por las poblaciones que dependen en ellos a través de la generación de espacios de diálogo entre los actores involucrados y las autoridades.

¹INAIGEM. (2016). *Situación de los glaciares y ecosistemas de montaña en el Perú: Informe anual 2016*, pág. 41. Huaraz.

²INAIGEM. (2015). *Impacto del cambio climático en las cordilleras glaciares del Perú*, pág. 15. Huaraz.

³Ibíd.: pág. 3.

⁴J. Bury et al. (2013). New geographies of water and climate change in Peru: Coupled natural and social transformations in the Santa River watershed. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 363-374. doi:10.1080/00045608.2013.754665.

⁵L. Ruttinger et al. (2015). *A new climate for peace: Taking action on climate and fragility risks*, pág. viii. An independent report commissioned by the G7 members. file:///C:/Users/COREI7/Downloads/NewClimateForPeace_FullReport_small_0.pdf

⁶Ibíd.: pág. 4.

⁷Ibíd.: págs. 5-6.

⁸Decreto Supremo No. 029-2018-PCM. (19 de marzo de 2018). *Aprueba reglamento que regula las políticas nacionales*. *Diario Oficial El Peruano*, Normas Legales, Poder Ejecutivo: Presidencia del Consejo de Ministros del Perú, págs. 7-8.

⁹Ibíd.: pág. 4.

¹⁰INAIGEM. (2016). *Plan estratégico institucional 2017-2019*, págs. 14-15. Huaraz.

¹¹Ibíd.: pág. 17.

¹²Ing. Benjamín Morales (al tiempo de la entrevista fue Presidente Ejecutivo del INAIGEM) entrevistado por el autor en Lima (04/12/17).

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 cinco números publicados 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