



REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Año 1, N° 1
Diciembre, 2016
Huaraz - Ancash



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto Nacional de
Investigación en Glaciares
y Ecosistemas de Montaña

REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

AÑO 1, NÚMERO 1 – DICIEMBRE 2016



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.

REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

INAIGEM

Presidente Ejecutivo

Ing. Benjamín Morales Arnao

Secretario General

Sr. Jorge Rojas Fernández

Editor

Mag. Steven A. Wegner

Comité Editorial

Ing. Ricardo Villanueva Ramírez

Ing. César Portocarrero Rodríguez

Ing. David Ocaña Vidal

Ing. Marco Zapata Luyo

Ing. Antonio Guerrero Villar

Bibl. Giber García Álamo

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 Haeblerli (Geographisches Institut, Universität Zürich, Suiza)

Ing. Zaniel Novoa Goicochea (Sociedad Geográfica de Lima / 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. Tiene como objetivo difundir los resultados de los 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 publica artículos científicos originales e inéditos en las áreas de glaciología y ecología de ecosistemas de montaña. Los trabajos recibidos son evaluados por árbitros externos según criterios de calidad.

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

©Copyright 2016. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Huaraz, Ancash, Perú.

ISSN 2519-7649

Tiraje: 1000 ejemplares

Comunicaciones:

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

Jr. Juan Bautista Mejía N° 887, Huaraz, Ancash, Perú.

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

Correo electrónico: swegner@inaigem.gob.pe

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

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

Impreso en: J&L Producciones de Javier Eduardo Farfán Ordóñez

Av. Augusto B. Leguía 375 – Independencia, Huaraz – Ancash

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 1016-17526

La revista está disponible a texto completo en:

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

Fotos de la portada: (arriba) Nevado Vallunaraju, Huaraz, Ancash (R. Villanueva); (derecha) Laguna Tullparaju, Huaraz, Ancash (R. Villanueva); (abajo) Rodal de *Puya raimondii*, Cajamarquilla, Huaraz, Ancash (INAIGEM drone); (izquierda) *Phoenicoparrus andinus* “parihuana”, Laguna Tapara, Cátac, Recuay, Ancash (R. Villanueva). **Foto de la contraportada:** Laguna Cuchillacocha, Huaraz, Ancash (R. Villanueva).

CONTENIDO

Mensaje del Presidente 7

Editorial 9

1. **Glaciares y los ecosistemas de montaña: Las importantes tareas pendientes** 11
Glaciers and mountain ecosystems: The important remaining tasks
Cedomir Marangunic

2. **Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en la Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991 y 2014** 21
Evolution and potential threat of glacial lakes in the Cordillera Vilcabamba (Cusco and Apurimac, Peru) between 1991 and 2014
Lucía Guardamino y Fabian Drenkhan

3. **Contemporary landscape changes in the Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash of Peru (1936-2012)** 37
Cambios en el paisaje contemporáneo de la Cordillera Blanca y la Cordillera Huayhuash del Perú (1936-2012)
Sergiu George Jiduc

4. **Descubrimiento del lago subglacial CECs en Antártica Occidental** 51
Discovering subglacial Lake CECs in western Antarctica
José Uribe, Rodrigo Zamora, Jonathan Oberreuter y Andrés Rivera

5. **Climbing for science and ice: From Hans Kinzl and mountaineering-glaciology to citizen science in the Cordillera Blanca** 59
Escalando por la ciencia y el hielo: De Hans Kinzl y montañismo-glaciología a ciencia ciudadana en la Cordillera Blanca
Mark Carey, Rodney Garrard, Courtney Cecale, Wouter Buytaert, Christian Huggel and Mathias Vuille

6. **Cambio climático: Pastizales altoandinos y seguridad alimentaria** 73
Climate change: High Andean rangelands and food security
Enrique R. Flores

7. **Mapeo de bofedales en cabeceras de cuenca mediante imágenes de los satélites Landsat** 81
Mapping peatlands in basin headwaters using Landsat satellite images
Jorge L. García, Bram L. Willems y Raúl Espinoza

8. **Cómo mueren los pumas: Del mito al rito en Huaraz (Centro-Norte del Perú)** 99
How pumas die: Myth and ritual in Huaraz (central-northern Peru)
Doris Walter

9. **Bosques de *Polylepis* como bancos genéticos para la restauración ecológica de los ecosistemas de montaña** 111
Polylepis forests as genetic banks for the ecological restoration of mountain ecosystems
David Ocaña Vidal y O. Jesús Santander

Declaración de Huaraz 117

Guía para Autores 120

MENSAJE DEL PRESIDENTE

Han pasado 50 años desde que iniciáramos en la Corporación Peruana del Santa, empresa de fomento y desarrollo de la cuenca del río Santa, las primeras investigaciones sobre los glaciares y riesgos existentes en la Cordillera Blanca. Nuestro campamento de Pati en Carhuaz albergó al primer grupo de profesionales que estudiaban las condiciones de peligrosidad de los glaciares y ejecutaba las obras de desagüe y seguridad con gran eficacia.

En las décadas siguientes tuvimos que asumir con mucho cuidado acciones respecto a la permanencia y continuidad del programa de Glaciología y Seguridad de Lagunas, que pasó por diferentes entidades de los sectores de Energía y Minas y de Agricultura; vivimos una casi permanente inestabilidad institucional por su falta de nivel estructural dentro de todas las entidades que la albergaron.

Nuestros continuos planteamientos de conferir a este programa un mayor nivel con autonomía fueron escuchados por el gobierno central en el año 2014, como una ratificación al compromiso ambiental peruano con el mundo, con ocasión de la COP 20, y mediante Ley N° 30286 se crea el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) como organismo técnico especializado adscrito al Ministerio del Ambiente, con personería jurídica de derecho público, con competencia a nivel nacional y autonomía administrativa, funcional, técnica, económica y financiera. Constituye pliego presupuestal. El INAIGEM cuya sede principal es la ciudad de Huaraz del departamento de Ancash, inicia el desarrollo de sus actividades en noviembre de 2015 abordando los temas de glaciares, ecosistemas de montaña e información y gestión del conocimiento.

En base a la calidad y experiencia del personal técnico-administrativo rigurosamente seleccionado, podemos presentar resultados relevantes en cada uno de los objetivos institucionales. Sin duda uno de los logros de gran connotación a nivel mundial fue el desarrollo del Foro Internacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña llevado a cabo del 10 al 13 de agosto de 2016. El generoso apoyo del Ministerio del Ambiente, además de una serie de instituciones nacionales y de la cooperación técnica internacional fue vital para el éxito alcanzado. Este evento contó con una concurrencia masiva de más de 1,200 personas, incluyendo la participación de 35 universidades nacionales y extranjeras y numerosas entidades de los sectores público y privado, quienes pudieron compartir y aprovechar las 11 conferencias magistrales, 40 conferencias de gran nivel y discusiones especializadas en 4 mesas temáticas sobre cambio climático, retroceso glaciar, riesgos glaciares, recursos hídricos, agro biodiversidad, seguridad alimentaria, financiamiento y otros temas de interés.

Como parte del Foro, se presentó el Pabellón de las Montañas en el excelente ambiente del Museo Arqueológico de Ancash, donde los estudiantes y público en general pudieron apreciar en posters, fotografías y muestras diversas, los resultados de las diferentes investigaciones realizadas sobre glaciares y ecosistemas de montaña efectuadas en el Perú y en otros países del mundo.

Los resultados de las investigaciones sobre riesgos asociados a glaciares han merecido nuestra dedicación prioritaria en forma coordinada con investigaciones realizadas por universidades extranjeras y misiones específicas de países amigos. El preocupante tema del alto riesgo latente que representa la laguna de Palcacocha para la ciudad de Huaraz, así como de otras lagunas glaciares declaradas peligrosas, merece nuestra atención prioritaria. El inventario y monitoreo de nuestras cordilleras y glaciares se está efectuando en forma periódica, habiendo extendido acciones de investigación hacia las cordilleras del centro y sur del país. Asimismo, la cuenca del río Rímac es de gran importancia estratégica, en especial el glaciar Shullcón que viene experimentando un franco proceso de reducción.

Las Cordilleras Glaciares del Sur del país han merecido nuestra atención especial, entre ellas, las Cordilleras Glaciares de Chila, en Arequipa; Huanzo, entre Arequipa, Apurímac y Cusco; La Raya entre Cuzco y Puno; y Chonta, entre Huancavelica y Junín, han sido declaradas cordilleras en extinción debido a la pérdida masiva de sus superficies y masas glaciares. Además, el Glaciar Ampay, al extremo suroeste de la Cordillera de Vilcabamba, es de gran preocupación por la reducción acelerada de sus glaciares y por ser la única fuente de agua para la ciudad de Abancay y áreas vecinas.

Las investigaciones en ejecución sobre los ecosistemas de montaña han sido de gran beneficio sobre el manejo de pastos naturales, bofedales, calidad de agua, y quenuales en las quebradas glaciares de Llaca, Quillcayhuanca y Santa Cruz, emplazadas en el flanco occidental de la Cordillera Blanca.

La investigación iniciada sobre el “cushuro”, alga de gran valor nutritivo en la comunidad de Cátac (Prov. de Recuay – Dpto. de Ancash), está avanzando hacia un valor de suma importancia por la propagación de su cultivo a nivel regional y nacional como una contribución a la solución del problema alimenticio del país.

Como iniciativa de gran proyección nacional se tiene el desarrollo del Corredor Ecosistémico entre la laguna de Llaca (4472 msnm), Huaraz, Punta Callán, Huinac, Cajamarquilla, Pampas Grande, Culebras y Huarmey en un recorrido de 180 km, atravesando una variedad de pisos ecológicos, de temperaturas diversas con comunidades en extrema pobreza, donde están instalándose siete parcelas de investigación de pastos naturales, tratamiento de áreas afectadas por incendios, forestación, cosecha del agua, lagunas de siembra de cushuro y cultivos mejorados; todo ello en trabajo conjunto con las comunidades locales y municipios distritales, en coordinación también con los sectores de turismo, cultura y educación, será de gran impacto para el desarrollo de esas comunidades.

Sin duda que la actividad de mayor proyección ha sido la instalación del Centro de Investigación y Tecnología “Reynaldo Trinidad Ardiles”, inaugurado en diciembre de 2016 en coordinación estrecha con la Comunidad Campesina de Cátac que nos ha cedido 30 hectáreas de terreno para investigación en pastos mejorados, cultivo de 289 variedades de papa nativa, rotación de áreas de cultivo y sembrío de quinua. Así como el tratamiento de ganado ovino de élite proveniente de Australia, el cual servirá para la distribución de embriones a nivel regional y nacional para la producción de carne, lana y queso gourmet. En este centro se construirá un local para albergar a 100 personas con todas las instalaciones necesarias, tales como aulas de clases, laboratorio, auditorios y ambientes para alojamiento, convirtiéndolo en un lugar de investigación y transferencia tecnológica para campesinos, investigadores y estudiantes.

La Dirección de Información y Gestión del Conocimiento de gran proyección, cuenta con un Departamento de Hidrometeorología, a través del cual se mantienen actualmente en operación 16 estaciones meteorológicas, en coordinación con la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, distribuidas en toda la región Ancash. La información procesada está siendo publicada en boletines hidrometeorológicos bimensuales. Asimismo esta Dirección se encarga de la capacitación del personal interno y externo, especialmente para colegios, escuelas, universidades y otros organismos (públicos y privados), en temas especializados que son competencia de nuestro Instituto. También, se encarga del procesamiento de imágenes satelitales para los trabajos de campo, la obtención y procesamiento de las imágenes de satélite PERUSAT I; de otro lado, tiene a cargo el funcionamiento e implementación de la Biblioteca Institucional, de publicación y difusión de todo tipo de información y conocimiento especializado y es responsable de la edición del boletín institucional y de la revista científica del INAI GEM, así como de la publicación de los documentos oficiales y del libro del Foro Internacional. Además, se están elaborando mapas topográficos a relieve a la escala 1:25,000, así como planos y mapas en base a levantamientos con drones.

Somos una institución reciente que tiene como visión trabajar por “un país moderno que aproveche sosteniblemente sus recursos naturales y que se preocupe por conservar el ambiente, conciliando el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental en beneficio de sus ciudadanos”, y como misión, “generar tecnología e información científica aplicada sobre glaciares y ecosistemas de montaña en beneficio de la población, recomendando las medidas de prevención frente a los riesgos en el marco del cambio climático con calidad y oportunidad”.

Por todo lo mencionado, me permito resaltar la importancia estratégica de la presente revista, para la difusión del conocimiento científicamente validado, obtenido a través de la investigación aplicada, que nos permita dar pasos sólidos y seguros para el manejo sostenible de los glaciares y ecosistemas de montaña, en beneficio de la población que los habita y del país en general. Confiamos que la revista que ahora ponemos a disposición del país, cumpla con su cometido.

EDITORIAL

Editar una revista técnica-científica es una gran oportunidad para difundir los resultados de diversas investigaciones y, a la vez, es una gran responsabilidad de mantener un nivel suficientemente alto de redacción y edición que sirva de buen ejemplo para las disciplinas pertinentes.

Consideramos que tratar los temas de glaciares y ecosistemas de montaña juntos en una revista especializada es una combinación novedosa que refleja la estrecha relación entre los glaciares y el agua que mantiene muchos de los ecosistemas de montaña. Algunos de los primeros artículos sobre glaciares del Perú se publicaron en revistas como el *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, el *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima* y la *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología*, la última editada por César Morales Arnao durante casi 30 años (1966-1995). En cuanto a los ecosistemas de montaña, se publicaron artículos en el *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, el *Boletín del Museo de Historia Natural "Javier Prado"* de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y el *Boletín de Lima*, igual como en publicaciones de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, la Universidad Nacional Agraria La Molina y el Centro Internacional de la Papa en Lima, entre otras instituciones especializadas.

En términos geográficos, nuestro enfoque principal es los Andes tropicales, pero no excluimos investigaciones en los Andes australes y aún en los Antártandes. En términos altitudinales, los ecosistemas de montaña se extienden desde la yunga hasta las cimas de los Andes, y abarcan una gran variedad de ambientes naturales con bosques, bofedales, pastizales y otras comunidades de flora y su respectiva fauna.

En este número tenemos artículos de dos de los ponentes magistrales del Foro Internacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, los doctores Cedomir Marangunic de Geoestudios en Santiago y Enrique Flores, Rector de la Universidad Nacional Agraria La Molina en Lima. Además, el artículo de García, Willems y Espinoza proviene de una ponencia presentada en la mesa temática de biodiversidad del Foro. La distribución geográfica de las contribuciones es preponderadamente del Perú, pero hay dos contribuciones de colegas sureños que nos informan sobre Chile y una parte especial de Antártida (o Antártica). Esperamos contar con artículos de Bolivia, Ecuador, Colombia y Argentina en el futuro. En términos temáticos, la distribución de artículos entre glaciares y ecosistemas de montaña es casi igual, pero estas proporciones pueden variar en números futuros de la Revista. Queremos tener aportes que incluyan tecnologías y metodologías novedosas y especialmente estudios que resulten en aplicaciones prácticas de temas como la mitigación de riesgos glaciares, el manejo racional e integrado de los recursos hídricos, la conservación y uso sostenible de ecosistemas de montaña, y la adaptación al cambio climático, entre otros temas de importancia ambiental y social.

Esperamos que nuestro esfuerzo ayude a motivar la investigación en glaciares y ecosistemas de montaña en los Andes y a promover la difusión de las técnicas y métodos utilizados y de los resultados obtenidos. Ahora en adelante, esta revista saldrá semestralmente en junio y diciembre. Invitamos a todos los investigadores interesados a enviarnos nuevos manuscritos para poder cumplir con nuestro cronograma de publicación.

El Editor

GLACIARES Y LOS ECOSISTEMAS DE MONTAÑA: LAS IMPORTANTES TAREAS PENDIENTES

Glaciers and Mountain Ecosystems: The Important Remaining Tasks

Cedomir Marangunic¹ (cmarangunic@geoestudios.cl)

¹GEOESTUDIOS, Chile

RESUMEN

Los glaciares importan en los ecosistemas de montaña por diversas razones, pero algunas de las más relevantes se refieren a los riesgos que la presencia de ellos origina, al aporte hídrico que ellos realizan, y por su contribución al mantenimiento de los ecosistemas.

Actualmente, existen metodologías y modelos, y la tecnología necesaria, como para estimar correctamente la mayoría de los riesgos generados por glaciares. Sin embargo, persiste un aspecto importante aún muy incierto. Se refiere a la presencia y extensión de la morrena de fondo en los glaciares y al control esencial que ella ejerce sobre la estabilidad mecánica de las masas de hielo.

Los glaciares se consideran a menudo como reservas de agua, aun cuando existe consenso en que el futuro de ellos es la extinción. Los glaciares aportan agua a sus cuencas en la medida que pierden masa de hielo, que es lo que produce su paulatina reducción. Si queremos que los glaciares persistan, debemos hacer algo para modificar sus balances de masa negativos hasta hacerlos al menos neutro; pero esto implica, necesariamente, un cero aporte de agua desde los glaciares a sus cuencas. De allí un dilema que debemos resolver: ¿queremos que continúe el aporte hídrico de los glaciares hasta su desaparición, o estamos dispuestos a hacer algo para que sobrevivan aceptando que, desde ya, dejarán de contribuir agua? Junto a esta inquietud, es importante avanzar en el manejo de los glaciares.

En cuanto a la biodiversidad, se ha comprobado que existe vida en glaciares por organismos adaptados a este ambiente extremo. Y si bien ello es una capacidad que importa a la humanidad, es poco lo que se ha avanzado en el conocimiento de la biodiversidad en los glaciares mismos.

Finalmente, la protección de glaciares es algo sobre lo cual parece no existir dudas en la mayoría de las sociedades del mundo, sin embargo ha sido difícil acordar una definición de glaciares y sus entornos, vale decir, de lo que queremos proteger.

Palabras clave: *Definición de glaciar, till subglacial, riesgos glaciares, aporte hídrico, biodiversidad en glaciares, manejo de glaciares*

ABSTRACT

Glaciers are important in mountain ecosystems for diverse reasons, but some of the most relevant ones refer to the risks that their presence originates, the water contribution that they provide, and their contribution to the maintenance of ecosystems.

Currently, there are methodologies and models and the necessary technology to be able to estimate correctly the majority of the risks generated by glaciers. Nevertheless, there remains one important aspect that is still very uncertain. This is the presence and extension of the ground moraine in glaciers and the essential control that it exercises on the mechanical stability of the masses of ice.

Glaciers are often considered to be water reserves, even when there is consensus that their future is extinction. Glaciers contribute water to their watersheds to the degree that they lose ice mass, which produces their gradual reduction. If we want glaciers to persist, we ought to do something to modify their negative mass balances to at least make them neutral, but this implies, necessarily, a zero contribution of water from the glaciers to their watersheds. There lies the dilemma that we should resolve: Do we want the water contribution of glaciers to continue until they disappear, or are we ready to do something to help them survive by accepting that, from now on, they will stop contributing water? Together with this question, it is important to make progress on the management of glaciers.

With regard to biodiversity, it has been shown that there is life on glaciers, consisting of organisms adapted to this extreme environment. And while it is a capability that matters to mankind, there has been very little advancement in knowledge of the biodiversity in the glaciers themselves.

Finally, the protection of glaciers is something about which there seem to be no doubts in the majority of societies in the world; nevertheless, it has been difficult to agree upon a definition of glaciers and their surroundings, it must be said, about what we want to protect.

Keywords: *Glacier definition, subglacial till, glacial risks, water contribution, glacial biodiversity, glacier management*

¿Qué son los glaciares? – Definición aún cuestionable.

La importancia que las comunidades atribuyen a los glaciares varía de una región a otra, pero algunas de las razones más relevantes se refieren al aporte hídrico que ellos realizan y la consecuente contribución al mantenimiento de los ecosistemas de montaña, a los riesgos que la presencia de ellos origina, a la relevancia de los glaciares como testigos del clima del pasado, a su valor paisajístico y otras razones. Por todo ello, la protección de glaciares y el estudio de ellos para reducir los riesgos, es algo sobre lo cual parece no existir dudas en la mayoría de las sociedades del mundo. Si bien peligros que se originan por la presencia de glaciares fueron señalados ya por de Saussure (1779-1796) antes del inicio de la glaciología propiamente tal con Agassiz (1840) y Tyndall (1896), la protección de glaciares comienza con el establecimiento de parques nacionales que los contienen y, más recientemente con la promulgación de leyes o reglamentos al respecto (República Argentina, 2011; República de Chile, 2015; Jailoobayev et al., 2009; Ministry for the Environment, New Zealand, 1991). Sin embargo, esta judicialización de los glaciares hace necesario acordar una definición de ellos, vale decir, de lo que queremos proteger, tan precisa como sea posible, lo que no ocurre actualmente.

Son numerosas las definiciones de glaciar que podrían citarse para ejemplificar la falta de concordancia entre ellas. Pero las siguientes son algunos ejemplos relevantes del último medio siglo (manteniendo el lenguaje en que fueron redactadas):

Meinzer (1942): *The general term glacier is applied to all bodies of land ice that consist of recrystallised snow accumulated on the surface of the ground...plastic flow may be said to be the distinctive characteristic of glaciers which sets them apart from all stationary bodies of accumulated snow.*

Shumskii (1964): *A glacier is a mass of ice formed from solid atmospheric precipitation and which is capable of moving independently.*

Armstrong, Roberts y Swithinbank (1973): *Glacier, a mass of snow and ice continuously moving from higher to lower ground or, if afloat, continuously spreading.*

Lliboutry (1973): *Es glaciar toda masa de hielo o firn proveniente de nieve, perenne a la escala de una vida humana.*

IPCC (2001): *Glacier is defined as a mass of land ice flowing downhill (by internal deformation and sliding at the base) and constrained by the surrounding topography (e.g. the sides of a valley or surrounding peaks); the bedrock topography is the major influence on the dynamics and surface slope of a glacier. A glacier is maintained by accumulation of snow at high altitudes, balanced by melting at low altitudes or discharge into the sea.*

Working Group on Mass-balance Terminology and Methods of the International Association of Cryospheric Sciences, IACS (2011): *Glacier, a perennial mass of ice, and possibly firn and snow, originating on the land surface by the recrystallization of snow or other forms of solid precipitation and showing evidence of past or present flow.*

IPCC (2013): *Glacier, a perennial mass of land ice that originates from compressed snow, shows evidence of past or present flow (through internal deformation and/or sliding at the base) and is constrained by internal stress and friction at the base and sides. A glacier is maintained by accumulation of snow at high altitudes, balanced by melting at low altitudes and/or discharge into the sea.*

Kargel et al. (2014): *Glacier, a mass of ice on the land surface which flows downhill under gravity and is constrained by internal stresses and friction at the base and sides. In general, a glacier is formed and maintained by accumulation of snow at high altitudes, balanced by melting at low altitudes or calving into the sea or lakes.*

En general parece haber consenso en que glaciar es una masa de hielo sobre tierra, originada principalmente por acumulación de nieve, que se desplaza lentamente pendiente abajo con o sin reptación sobre su lecho (lo cual depende en parte importante de la temperatura del hielo), y que se extingue en cotas bajas o descarga en el mar o, como muchas veces ocurre, en lagos. Respecto a la persistencia de un glaciar, no nos parece que la común definición de perenne, empleada habitualmente en expresiones relacionadas con la botánica (Real Academia Española, 2014) y que señala que es algo que vive más de dos años, sea la adecuada para describir glaciares, que son, generalmente, masas de hielo que se ubican en ciertas localizaciones desde el ápice de la última glaciación, miles de años atrás. Es preferible adoptar la calificación de perenne expresada por Lliboutry (1973) como “perenne a escala de una vida humana”, vale decir al menos medio siglo de persistencia pues, de lo contrario sería necesario incorporar en los catastros de glaciares numerosos pequeños campos de nieve de dos o pocos años más de duración según las particulares condiciones climáticas de ciertas temporadas de invierno o verano.

Virtualmente, todas las definiciones de glaciar incorporan la noción de movimiento de la masa de hielo bajo su propio peso (el influjo de la gravedad). Pero, como lo señalaron Post et al. (1971), la definición de glaciar en cuanto a que fluye por su propio peso se complica porque, entre otros, también exhiben flujo desde pequeñas a grandes acumulaciones de nieve o neviza en pendientes, o tenues lentes de hielo en acantilados. Por esto, nos parece conveniente acotar la noción de movimiento al flujo general de grandes masas de hielo, como son los glaciares, el cual depende principalmente de la deformación de sus partes más estresadas, normalmente los estratos basales y las márgenes, donde los esfuerzos comúnmente varían entre 50 y 150 kPa (Cuffey y Paterson, 2010). El esfuerzo de fatiga, bajo el cual el hielo se deforma perceptiblemente (reptación terciaria), es del orden de 100 kPa (y algo mayor para hielo más frío) lo cual equivale a una carga de 11,1 m de hielo de densidad 0,9 g/cm³. Considerando lo expuesto, proponemos aceptar para la definición de glaciar un espesor mínimo de 8 m.

En cuanto al tamaño mínimo de masas de hielo para ser consideradas glaciar, en la primera guía de UNESCO-IASH (1970) para el inventario de glaciares solo se permitían dos decimales en una cifra expresada en kilómetros cuadrados, vale decir un tamaño mínimo de 0,01 km² y reconociendo que estos tamaños menores podrían ser campos de nieve más que glaciares. Esto parecía razonable para inventarios orientados al conocimiento de los recursos hídricos de un país. Sin embargo, la recomendación del World Glacier

Monitoring Service (Paul, 2009) de 0,01 km² instituye esa dimensión como tamaño mínimo de glaciares que deben incluirse en los inventarios, en consideración a que hielos de dimensiones menores podrían no ser glaciares.

Todos los glaciares temperados o politérmicos contienen agua en muy diversas formas (ver, por ejemplo, Glazovskii y Macheret, 2014) y todos los glaciares contienen algún grado de impurezas, las que pueden ir desde aquellas imperceptibles y solo presentes en los núcleos de condensación de la precipitación, hasta el importante contenido de detritos rocosos en los glaciares de rocas (ver Figura 1) glaciogénicos y más aún en aquellos criogénicos (ver, por ejemplo, Whalley y Martin, 1992). Esto es conveniente reflejarlo en la definición de glaciar, una geoforma que no es solo hielo.

Considerando lo anterior, la definición de glaciar que propongo es como sigue:

Los glaciares son grandes masas de hielo, con o sin agua intersticial o impurezas, originados sobre tierra principalmente por metamorfismo a hielo de acumulaciones de nieve, balanceado por fusión en cotas bajas o descargas a lagos o al mar. Los glaciares fluyen lentamente pendiente abajo, porque el hielo se deforma bajo su propio peso y porque el glaciar desliza sobre el lecho cuando no se adhiere a él. Los glaciares son perennes a la escala de una vida humana, y de dimensiones igual o mayor que 1 ha y a lo menos 8 m de espesor.



Figura 1. Glaciares de rocas, glaciogénicos (con núcleo de hielo), en la cordillera del centro de Chile. Foto: A. Warren.

Riesgos: Conocer la morrena de fondo - el gran tema pendiente.

La presencia de glaciares suele generar riesgos a personas y bienes. Los mayores riesgos se originan por algunos de los siguientes peligros:

- **DESLIZAMIENTO CATASTRÓFICO:** grande, súbito y violento de gran parte o de todo un glaciar.
- **GLOF (Glacier Lake Outburst Flood):** descarga rápida de un lago proglacial.
- **LAHAR:** flujo denso por el arrastre de detritos, originado por la fusión rápida de glaciares y nieves en conos volcánicos en erupción.
- **SURGIENTE:** avance rápido de un glaciar, por ejemplo en centenas de metros por año.
- **DESPRENDIMIENTO:** de una porción de hielo desde un abrupto frente glaciar.

Los riesgos por la presencia de glaciares se suelen multiplicar por efectos secundarios. Por ejemplo, la caída de una gran masa de hielo sobre un lago proglacial, o cercano a un glaciar, puede originar una ola con capacidad de romper la contención del lago y producir un catastrófico flujo de descarga, mucho más violento que la caída sobre el lago de la masa de hielo.

Actualmente, existen metodologías y modelos, y la experiencia y tecnología necesarias como para estimar correctamente la mayoría de los riesgos generados por glaciares. Sin embargo, persiste un aspecto importante aún muy incierto. Esto se refiere a la presencia y extensión de la morrena de fondo en los glaciares y al control esencial que ella ejerce sobre la estabilidad mecánica de las masas de hielo, o sea, sobre la posibilidad de que todo o parte de un glaciar se deslice repentina y violentamente.

Para evaluar la estabilidad mecánica de todo o parte de un glaciar importa, además de las características relativamente

simples de evaluar de su línea de base, tales como espesor, densidad incluidas las impurezas, pendiente del lecho, temperatura del hielo, grietas en el glaciar, y otros, los siguientes aspectos internos y externos al glaciar:

- La presión de poros que ejerce el agua en glaciares temperados o politérmicos,
- La eventual aceleración de partículas, como las que causa un sismo, y
- Los materiales que conforman el lecho sobre el cual descansa el glaciar, ya sea roca, la morrena de fondo (o till), u otros.

La presión de poros es muy variable en un glaciar, entre otros por los diversos tipos de drenaje que ocurren en un glaciar, desde el muy lento escurrimiento entre los cristales de hielo a la torrencial descarga en los molinos glaciares. Pero la máxima presión de poros se produce cuando se observa agua en la superficie glaciar, por ejemplo en grietas inundadas, o cuando se registra en sensores en pozos en el hielo la presencia de agua cercana a la superficie. En otras palabras, es posible estimar las condiciones de agua en el glaciar.

También es posible evaluar la aceleración de partículas que puede sufrir un glaciar. En regiones sísmicas (y la alta montaña por contextura geológica suele ser una región sísmica) la dominante causa de aceleración de partículas son los eventos sísmicos, con magnitudes que exceden con creces a aquellas que pudieran producirse en un evento antrópico, como por el empleo de explosivos en obras civiles, o grandes tronaduras en desarrollos mineros. En todo caso, ante la eventual ocurrencia de ambos tipos de eventos, naturales o antrópicos, es posible estimar con un buen grado de certeza la aceleración de partículas que un particular evento puede producir.

La extensión y propiedades del material que conforma el lecho de un glaciar es sencillo de estimar cuando está constituido por la roca basal. Pero si en el lecho del glaciar existe una morrena de fondo (ver Figura 2), y si ésta es tenue, es muy complicado evaluar sus propiedades y su extensión, lo que se hace especialmente difícil en las zonas cubiertas por detritos de glaciares cubiertos o en los glaciares de rocas. A partir de la información obtenida de algo más de 100 sondajes que en Chile alcanzaron el lecho de glaciares, principalmente glaciares de rocas, se ha producido (Marangunic y Marangunic, 2010) la Tabla 1 que muestra, en una primera aproximación, la extensión del lecho rocoso y de la morrena de fondo.



Figura 2. Aspecto de la morrena de fondo (till) bajo el frente del glaciar Altar Sur en Chile central.

ZONA DEL GLACIAR	PENDIENTE DEL LECHO	PROPORCIÓN DE LA BASE DEL GLACIAR APOYADA EN ROCA
ACUMULACIÓN	0° - 19°	100% en contacto con roca
		Sin contacto con roca, todo till
ABLACIÓN	20° - 26°	10% en contacto con roca, resto till
	27° - 80°	50% en contacto con roca, resto till
	>80°	>75% en contacto con roca, resto till

Tabla 1. Porción de la base del glaciar apoyada en roca (el resto es morrena de fondo, o till), según resultados de más de 100 sondajes perforados en Chile hasta la base de glaciares.

La morrena de fondo importa, especialmente, por ser un material de pobres características geotécnicas. La granulometría es heterogénea, pero con un porcentaje de finos habitualmente por sobre el 10%, y hasta más de 20%, todo lo cual la hace porosa pero poco permeable. Saturada, por debajo de un glaciar temperado deslizando lentamente, es un material de muy baja cohesión, cercana a 0,1 kg/cm², y ángulo de fricción interna de aproximadamente 11° a 28° (ver, por ejemplo, Marangunic, 1997; Marangunic y Marangunic, 2010; Ugalde, 2016).

Si con estas condiciones de morrena de fondo se realiza el análisis de estabilidad de un glaciar en particular, suponiendo variadas situaciones, tales como:

- Caso normal: lecho rocoso bajo Zona Acumulación, y morrena de fondo bajo Zona Ablación, presión de poros baja y sin movimiento sísmico (estático),

- Caso “extremo”: morrena de fondo de baja cohesión (0,1 kg/cm²) y bajo ángulo de fricción interna (11°) en toda la base del glaciar según pendiente, presión de poros baja, y sin movimiento sísmico (estático),
- Caso sismo: aceleración de 0,2 g (norma chilena para cordillera) o más según localidad y región,
- Caso presión de poros: presión de agua en los poros al máximo nivel posible (glaciar saturado en 90%), se obtiene resultados de Factor de Seguridad (FS) como los que se muestra en la Tabla 2, en que cada Perfil es el análisis empleando una sección longitudinal de un glaciar.

Los resultados de la Tabla 2 indican que sismos importantes, o condiciones de alta presión de poros, por sí solos no afectan mayormente la estabilidad de un glaciar. (FS>1) cuya morrena de fondo tiene una extensión que se

PERFIL	SITUACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD
PERFIL #1	Normal Estática	>10
	Normal + Presión y Sismo	>10
	Extremo Estática	1.57
	Extremo + Presión y Sismo	0.69
PERFIL #3	Normal Estática	>10
	Normal + Presión y Sismo	>10
	Extremo Estática	1.68
	Extremo + Presión y Sismo	1.12
PERFIL #4	Normal Estática	>110
	Normal + Presión y Sismo	7.68
	Extremo Estática	1.87
	Extremo + Presión y Sismo	0.75
PERFIL #5	Normal Estática	>10
	Normal + Presión y Sismo	7.38
	Extremo Estática	2.20
	Extremo + Presión y Sismo	0.94
PERFIL #6J	Normal Estática	>10
	Normal + Presión y Sismo	>10
	Extremo Estática	0.32
	Extremo + Presión y Sismo	0.24
PERFIL #6L	Normal Estática	>10
	Normal + Presión y Sismo	4.76
	Extremo Estática	4.8
	Extremo + Presión y Sismo	0.94
PERFIL #7	Normal Estática	>10
	Normal + Presión y Sismo	>10
	Extremo Estática	0.74
	Extremo + Presión y Sismo	0.44

Tabla 2. Fuente: EIA del Proyecto Andina 244, Chile.

considera normal. Pero si la morrena de fondo se extiende bajo gran parte del glaciar, esta sola condición puede hacer un glaciar inestable aún sin efecto sísmico; pero si se conjugan la condición extrema (morrena de fondo bajo todo el glaciar) con presión de poros y un efecto sísmico, el FS suele estar bajo 1, valor que marca el límite entre lo estable y lo inestable. Vale decir, la extensión de la morrena de fondo es un factor predominante en la determinación del grado de estabilidad mecánica de un glaciar, y es muy escasa la información que existe al respecto.

Recursos hídricos, el dilema: Más agua o glaciares duraderos.

Los glaciares se consideran a menudo como reservas de agua, aun cuando existe consenso en que el futuro de la mayoría de ellos es la extinción, en plazos variados según condiciones locales y dimensiones de las masas de hielo. El efecto de la presencia de glaciares en cuencas hídricas es de dos tipos: regulan los caudales entregando agua de manera

moderada durante toda la estación estival, y contribuyen con agua a sus cuencas. Los glaciares aportan agua a sus cuencas en la medida que pierden masa de hielo, que es lo que produce su paulatina reducción.

La descarga hídrica (Q) desde una cuenca es:

$$Q = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración}$$

Pero si hay un glaciar en la cuenca, entonces la descarga es en términos anuales (UNESCO, 1973) y considerando la sublimación de sólido (nieve o hielo) a vapor:

$$Q = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} \pm (\text{Balance de Masa anual del glaciar} - \text{sublimación})$$

Si el glaciar pierde masa (se reduce en volumen y su frente retrocede), significa que entrega a la cuenca agua adicional a aquella que sobre el precipita. Pero si el glaciar gana masa (aumenta de volumen y avanza), es porque retiene parte de la precipitación caída sobre su superficie. Y si el glaciar está estable (Balance de Masa = 0), entrega a su cuenca sólo el equivalente a la precipitación caída sobre el glaciar.

Como los glaciares de la Cordillera de los Andes y del mundo entero retroceden en su gran mayoría, significa que entregan a sus cuencas agua adicional a aquella de la precipitación, y que se origina en sus balances de masa negativos, vale decir, en la cantidad de hielo que pierden anualmente una vez descontada la sublimación y la evaporación desde sus superficies. Si esta condición de balances de masa negativos continúa, los glaciares se reducirán hasta la extinción; los pequeños en pocos años o decenas de años, los mayores a largo plazo.

Un retroceso acelerado de los glaciares significa mayores aportes hídricos durante un tiempo menor.

Si queremos que los glaciares persistan, debemos hacer algo para modificar sus balances de masa negativos

hasta hacerlos al menos neutro; pero esto implica, necesariamente, un cero aporte de agua desde los glaciares a sus cuencas y, también, intervenir los glaciares. De allí un dilema de prioridades que debemos resolver: ¿queremos que continúe el aporte hídrico de los glaciares hasta que estos desaparezcan, o estamos dispuestos a hacer algo, vale decir intervenirlos, para que persistan en el tiempo aceptando que, desde ya, dejarán de contribuir agua?

En el escenario climático actual y futuro próximo, solo es posible tener glaciares estables y que entreguen agua, aprendiendo a manejar, o gestionar, los glaciares. Para extraer de ellos agua cuando la necesitemos y repletarlos, vale decir restituirles la masa removida o perdida, en otras ocasiones.

Biodiversidad en los glaciares: Una investigación aún en ciernes.

Si bien la biodiversidad, en general, se reduce con la mayor cota y latitud (hacia regiones más frías) la importancia de los glaciares en los ecosistemas, por sobre todo en aquellos acuáticos de montañas en regiones frías, es innegable por cuanto influyen los procesos hidrológicos, enlazando las condiciones atmosféricas con los sistemas hídricos. Este significado se hace más notorio en un entorno en el cual los glaciares se reducen drásticamente (ver, por ejemplo, Milner, Brown y Hannah, 2008; Edwards et al., 2013; Takeuchi, 2001).

Es bastante lo que se ha escrito y se conoce sobre la biodiversidad en el entorno de los glaciares, pero es más bien escaso lo que se sabe de la presencia de especies en los glaciares mismos, vale decir, de formas de vida que realizan todo su ciclo vital en los glaciares (ver Figuras 3 y 4). Se ha comprobado que existe vida en glaciares (ver, por ejemplo, Hartzell et al., 2005; Takeuchi, 2001) por organismos adaptados a este ambiente extremo. Y si bien ello es una capacidad que importa a la humanidad, como

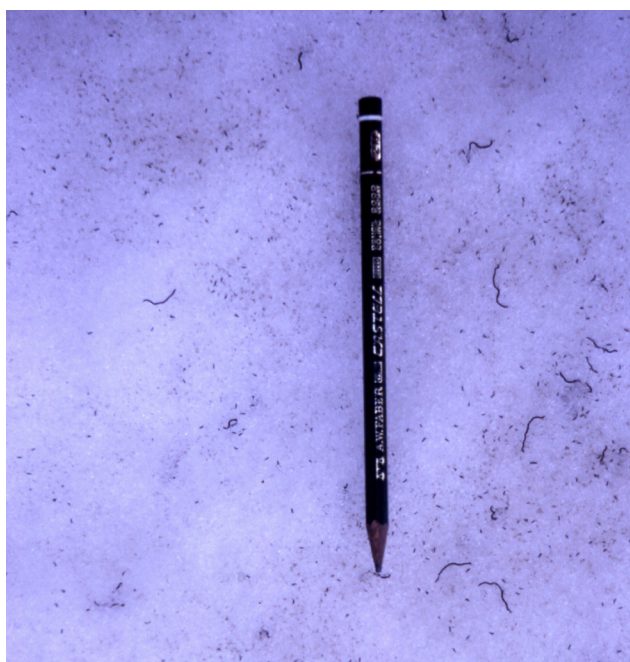


Figura 3. Gusanos del género *Mesenchytraeus* en la superficie del Glaciar Sherman, Alaska.



Figura 4. Algas verdes bajo el espejo de agua de una laguna termokárstica en un glaciar de rocas en la cordillera del centro de Chile. Foto: G. Casassa.

por ejemplo el empleo por los gusanos de hielo de proteínas anticongelantes que resisten el frío (Hartzell et al., 2005), es poco lo que se ha avanzado en el conocimiento de la biodiversidad en los glaciares mismos y en cómo esta biodiversidad afecta el balance de masa de los glaciares (Takeuchi et al., 2002).

Evidentemente, la biodiversidad en glaciares es un campo de investigación que requiere mayor impulso y desarrollo.

Ecosistemas de montaña: Hacia el manejo de glaciares.

Diversos desarrollos, tales como carreteras, minas, líneas de alta tensión, hidroeléctricos, turísticos, agrícolas (que incluyen quemadas de la vegetación) y varios otros, están alcanzando las más altas cotas de las cadenas montañosas, áreas que normalmente se consideraban prístinas y nombradas como “el reino de las nieves”, supuestamente fuera del alcance del avance humano. Este ascenso a las montañas ha ido asociado con un notable desarrollo tecnológico de todo tipo y que, en el pasado no muy distante, se elogiaba como importantes logros de la humanidad. Pero la percepción ha cambiado, y lo que antes se elogiaba hoy en día se mira con preocupación por las intervenciones que ocurren en estas áreas consideradas vírgenes y, en especial, el efecto sobre los glaciares. Como resultado de esta tendencia, grandes áreas montañosas se están cerrando al desarrollo de proyectos, básicamente con la formación de parques nacionales que impiden nuevas actividades en esas áreas, mientras que, por otro lado, se formulan leyes para la protección de glaciares (República Argentina, 2011; República de Chile, 2015).

Como suele ser imposible que los proyectos de desarrollo

en la alta montaña no produzcan algún grado de afectación de sus entornos y de los glaciares, y ello asociado al hecho que los glaciares se están reduciendo notablemente (Kargel et al., 2014; WGMS, 2008; WGMS, 2012; WGMS 2013) desde el máximo de la última glaciación ocurrido aproximadamente 18.000 años atrás, por causas climáticas naturales y también antrópicas, y sin que se visualice un fin a esta tendencia (Berger y Loutre, 2002), si queremos que al menos algunos glaciares persistan en los ambientes de montaña se hace extremadamente necesario desarrollar medidas que permitan salvarlos, lo que se conoce como “el manejo de glaciares”. Medidas de este tipo consideran, entre otras, el incremento artificial del espesor del manto de nieve, o la reducción de la tasa de ablación (Marangunic, 2010; Morales, 2010), e incluso la generación de nuevos glaciares (Arnoldy, 2009; Marangunic, 2010, y Figura 5). La regeneración de glaciares afectados por eventos catastróficos ocurre de manera natural (Ugalde et al., 2015), de manera que no debiera sorprender la probabilidad de generar artificialmente nuevos glaciares. Aún más, esta probabilidad indudablemente mejora si se apoya a la naturaleza con el estudio de glaciares y el desarrollo de técnicas apropiadas que ayuden a la recuperación.

Visto así, la protección de glaciares implica intervención, pero una intervención para salvarlos del proceso de extinción que los afecta. Pareciera que las tecnologías ya probadas permiten salvar a los relativamente pequeños glaciares de montaña, pero hacer lo mismo con los grandes glaciares implica significativos costos económicos y el desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías. Pero solamente así se podrá extraer agua de los glaciares cuando se necesite (Figura 6), y reponer esas extracciones en años de mayor abundancia de las precipitaciones para, de esa manera, conservar los glaciares para el futuro y para que continúen sirviendo a los ecosistemas de montaña.

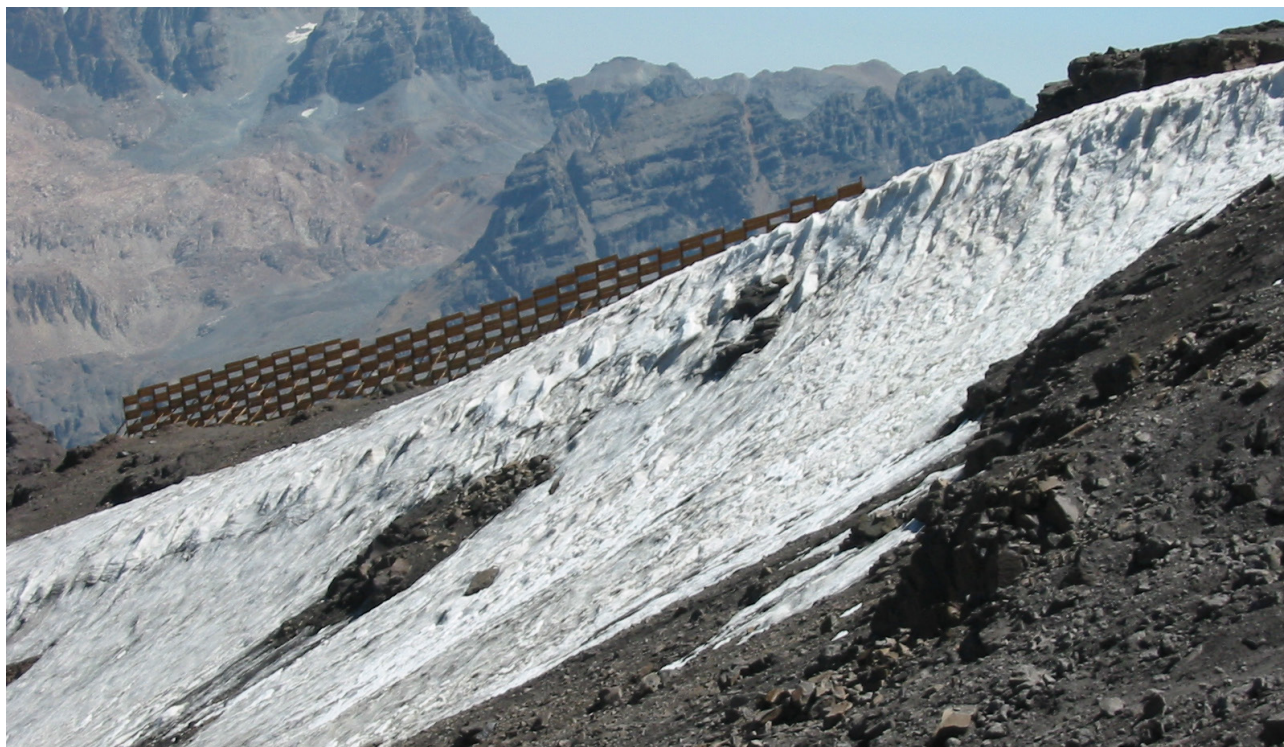


Figura 5. Un pequeño glaciar que se ha formado a sotavento de una valla de nieve, construida en la cordillera de Chile central para explorar la posibilidad de generar artificialmente un glaciar.



Figura 6. Incremento artificial de la tasa de fusión de un glaciar en la cordillera del centro de Chile, mediante fumigación aérea, incrementándola de 1,7 g/cm² día a 2,7 g/cm² día. Experiencias del año 1969.

REFERENCIAS

- Agassiz, L. (1840). *Études sur les glaciers*. Neuchatel, Suiza, Jent et Gassmann.
- Armstrong, T., Roberts, B. y Swithinbank, C. (1973). *Illustrated glossary of snow and ice*. Cambridge, Scott Polar Research Institute.
- Arnoldy, B. (21 de octubre de 2009). Global warming: Indians decide to make their own glaciers. *The Christian Science Monitor*. Recuperado de <http://www.csmonitor.com/World/2009/1021/p11s01-wogn.html>
- Berger, A. y Loutre, M. F. (2002). An exceptionally long interglacial ahead? *Science*, 297(5585), 1287-1288. doi: 10.1126/science.1076120
- Cuffey, K. M. y Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.
- De Saussure, H.-B. (1779-1796). *Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève*. 4 vols. Neuchatel, Suiza, Chez Samuel Fauche.
- Edwards, A., Rassner, S. M. E., Anesio, A. M., Worgan, H. J., Irvine-Fynn, T. D. L., Williams, H. W.,... Griffiths, G. W. (2013). Contrasts between the cryoconite and ice-marginal bacterial communities of Svalbard glaciers. *Polar Research*, 32, 19468. doi.org/10.3402/polar.v32i0.1946
- Glazovskii, A. y Macheret, Y. (2014). *Voda v lednikah; Metodi i rezultati geofizicheskikh i distancionnih issledobanii*. Rossiskaya Akademiya Nauk, Institut Geografii RAN, GEOS, Moscú.
- Hartzell, P. L., Nghiem, J. V., Richio, K. J. y Shain, D. H. (2005). Distribution and phylogeny of glacier ice worms (*Mesenchytraeus solifugus* and *Mesenchytraeus solifugus rainierensis*). *Canadian Journal of Zoology*, 83(9), 1206-1213.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001). Annex B: Glossary of terms. En *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Annex III: Glossary. En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. IPCC Working Group I Contribution to AR5. Cambridge, Cambridge University Press.
- Jailoobayev, A., Neronova, T., Nikolayenko, A. y Mirkhashimov, I. (2009). *Water quality standards and norms in Kyrgyz Republic*. Almaty, Kazajistán, The Regional Environmental Center for Central Asia.
- Kargel, J. S., Leonard, G. L., Bishop, M. P., Kääb, A. y Raup, B. H. (Eds.). (2014). *Global land ice measurements from space [GLIMS]*. Springer Praxis Books.
- Lliboutry, L. (1973). *Hidrología de nieves y hielos en América Latina*. Notas de clase, II Curso del Prof. L. Lliboutry. Montevideo, Oficina de Ciencias de la UNESCO para América Latina.
- Marangunic, C. (1997). Deslizamiento catastrófico del glaciar en el Estero Aparejo. *Actas del IV Congreso Chileno de Geotecnia*, 2, 617-626.

- Marangunic, C. (2010). Management of glaciers: experiences and results in Chile. International Glaciological Conference (VICC 2010) "Ice and Climate Change: A view from the South". Valdivia, Chile, Feb. 1-3, 2010. *Abstract Book*, 49(61). CECs, Valdivia, Chile.
- Marangunic, C. y Marangunic, P. (2010). Physical characteristics of rock glaciers in the mountains of central Chile. International Glaciological Conference (VICC 2010) "Ice and Climate Change: A view from the South", Valdivia, Chile, Feb. 1-3, 2010. *Abstract Book*, 48(60), poster presentation (ver poster en www.geoestudios.cl/extras/descarga). Valdivia, Chile, Centro de Estudios Científicos.
- Meinzer, O. (Ed.). (1942). *Hydrology*. New York, Dover Publications.
- Milner, A. M., Brown, L. E. y Hannah, D. M. (2008). Hydroecological response of river systems to shrinking glaciers. *Hydrological Processes*, 23(1).
- Ministry for the Environment, New Zealand. (1991). *Resource Management Act 1991*.
- Morales, B. (2010). Pruebas para la reducción de la fusión de los glaciares. En *Patronato del Museo de las Montañas Andinas*. Huaraz, Perú. [18 pp.]
- Paul, F. (Ed.) (2009). *Guidelines for the compilation of glacier inventory data from digital sources*. World Glacier Monitoring Service and GLIMS.
- Post, A., Richardson, D., Tangborn, W. V., y Rosselot, F. L. (1971). *Inventory of glaciers in the North Cascades, Washington*. U.S.G.S. Professional Paper 705-A. Washington, D.C., U.S. Geological Survey.
- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la lengua española*. (23a ed.). Madrid, Espasa Calpe.
- República Argentina. (2011). Decreto No 207/2011 - Apruébase la reglamentación del régimen de presupuestos mínimos para la preservación de glaciares y del ambiente periglacial. *Boletín Oficial*, Año 99(32), 102.
- República de Chile. (2015). *Boletín* N° 9364-12. Cámara de Diputados, Sesión 6a, 31 Marzo 2015, Redacción de Sesiones. <http://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=11044 &prmTIPO=TEXTOSesion>
- Secretariat of the Global Terrestrial Observing System (GTOS). (2007). *Assessing the status of the development of standards for the essential climate variables in the terrestrial domain*. Progress report to the 26th Meeting of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice.
- Shumskii, P. A. (1964). *Principles of structural glaciology*. New York, Dover Publications.
- Takeuchi, N. (2001). The altitudinal distribution of snow algae on an Alaska glacier (Gulkana Glacier in the Alaska Range). *Hydrological Processes*, 15(18), 3447-3459.
- Takeuchi, N., Koshima, S., y Segawa, T. (2002). Effect of cryoconite and snow algal communities on surface albedo on maritime glaciers in south Alaska. *Bulletin of Glaciological Research*, 20, 21-27.
- Tyndall, J. (1896). *The glaciers of the Alps*. Londres, Longmans, Green and Co.
- Ugalde, F. (2016). *Estimación de peligro ante deslizamiento de glaciares en Chile central: el caso del Glaciar Aparejo*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago, Chile.
- Ugalde, F., Casassa, G., Marangunic, C., Mujica, R. y Peralta, C. (2015). El deslizamiento catastrófico del Glaciar Aparejo: 35 años después. [Área Temática 3: Geología del Cuaternario y Cambio Climático; Sesión Temática 9: Morfoestratigrafía, Geomorfología, Hidrogeología y Glaciología.] XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, 4 al 8 de octubre de 2015. *Actas* 2, 686-689.
- UNESCO-IASH. (1970). *Perennial ice and snow masses: A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory*. Technical Papers in Hydrology, 1. Francia.
- WGMS - World Glacier Monitoring Service. (2008). Zemp, M., Roer, I., Kääb, A., Hoelzle, M., Paul, F. y Haerberli, W. (Eds.). *Global glacier changes: facts and figures*. UNEP/World Glacier Monitoring Service, Zurich, Suiza.
- WGMS - World Glacier Monitoring Service. (2012). Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F. y Haerberli, W. (Eds.). *Fluctuations of glaciers 2005-2010* (Vol. X). ICSU (WDS)/ IUGG (IACS)/ UNEP/ UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Suiza. Basado en la versión: doi: 10.5904/wgms-fog-2012-11
- WGMS - World Glacier Monitoring Service. (2013). Zemp, M., Nussbaumer, S. U., Naegeli, K., Gärtner-Roer, I., Paul, F., Hoelzle, M. y Haerberli, W. (Eds.). *Glacier mass balance bulletin N° 12 (2010-2011)*. ICSU (WDS)/ IUGG (IACS)/ UNEP/ UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Suiza. Basado en la versión: doi: 10.5904/wgms-fog-2013-11
- Whalley, W.B. y Martin, H. E. (1992). Rock glaciers: II models and mechanisms. *Progress in Physical Geography*, 16(2), 127-186.
- Working Group on Mass-balance Terminology and Methods of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS). (2011). *Glossary of glacier mass balance and related terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology, 86; IACS Contribution, 2. Paris, UNESCO.

EVOLUCIÓN Y POTENCIAL AMENAZA DE LAGUNAS GLACIARES EN LA CORDILLERA DE VILCABAMBA (CUSCO Y APURÍMAC, PERÚ) ENTRE 1991 Y 2014

Evolution and Potential Threat of Glacial Lakes in the Cordillera Vilcabamba (Cusco and Apurimac, Peru) between 1991 and 2014

Lucía Guardamino¹ (a20081066@pucp.pe) y Fabian Drenkhan^{1,2}

¹Geografía y Medio Ambiente, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

²Eclim research group, Departamento de Geografía, Universidad de Zúrich, Zúrich, Suiza

RESUMEN

En las últimas décadas, los glaciares de diferentes regiones montañosas han experimentado un retroceso sin precedentes desde finales de la Pequeña Edad de Hielo (LIA). Este proceso contribuye a la formación y crecimiento de lagunas glaciares, que en conjunto con otros componentes de potencial amenaza pueden generar condiciones más frecuentes y aptas para la ocurrencia de un desastre, como flujos por el desborde violento de una laguna glaciar (GLOFs). En los Andes del Perú, varios GLOFs han cobrado un gran número de pérdidas humanas y materiales, pero la colección de datos y la implementación de programas de monitoreo basados en la amenaza son escasos.

Este estudio se centra en cambios de superficies lagunares y glaciares en la poco estudiada Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú). Presentamos un marco multitemporal y semiautomatizado basado en el Índice Normalizado Diferencial del Agua (NDWI) y el Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI) usando imágenes Landsat TM 5 y OLI 8 en el periodo 1991-2014. Nuestros resultados indican un fuerte retroceso del área glaciar de 51% entre 1991 (201.0 km²) y 2014 (98.9 km²). En el mismo periodo, el número de lagunas (superficie lagunar total) se ha incrementado de 247 (4.1 km²) en 1991 a 329 (5.2 km²) en el año 2014 lo cual corresponde a un crecimiento acelerado de 0.8% (0.6%) de 1991 a 2001 y 2.3% (1.7%) de 2010 a 2014, respectivamente. El mayor crecimiento de lagunas se ha identificado en áreas de altitud elevada (4400-4800 msnm) particularmente durante el último periodo (2010-2014) lo cual podría ser correlacionado a la desglaciación actual y, por ende, a cambios en características geomorfológicas. La discriminación de lagunas y el análisis de potencial amenaza se llevaron a cabo en un protocolo de cuatro etapas, en primer lugar, basado en las variaciones superficiales de lagunas y la posible exposición de centros poblados ante un GLOF aguas abajo. Se aplicó criterios adicionales incluyendo (a) distancia glaciar-laguna, (b) tipo de dique, (c) periodo de formación, (d) pendientes críticas y (e) estimaciones de volumen. Un total de 52 "lagunas indicadores" han sido identificadas, de las cuales 13 lagunas glaciares están en contacto con 15 centros

poblados expuestos aguas abajo. Dos de estas lagunas han sido clasificadas en un nivel de potencial amenaza bajo-mediano y tres en un nivel mediano-alto.

Nuestros resultados tienen diferentes implicancias para la investigación y gestión del agua futuras. El continuo derretimiento glaciar y desarrollo de lagunas generan condiciones potenciales de amenaza y riesgo. Sin embargo, emergen oportunidades para una futura gestión (integrada) del agua considerando la necesidad de nuevos reservorios, p. ej., para la demanda de agua creciente de agricultura e hidroenergía en la región. La metodología presentada facilita un análisis efectivo y extenso de amenaza que debería ser corroborado también con data in situ y criterios adicionales aplicados a otras cordilleras glaciares. Futuros estudios deberían enfocarse en un mayor desarrollo de un análisis detallado, continuo y estandarizado de amenaza y riesgo, y monitoreo de lagunas glaciares.

Palabras clave: *Andes tropicales, derretimiento glaciar, aluvión, Cordillera de Vilcabamba, sensoramiento remoto*

ABSTRACT

In recent decades, glaciers in different high-mountain regions have experienced unprecedented shrinkage since the end of the Little Ice Age (LIA). This process triggers the formation and growth of glacier lakes, which in combination with other potential hazard components can result in more likely conditions prone to the occurrence of disasters, such as Glacier Lake Outburst Floods (GLOFs). In the Peruvian Andes, multiple GLOFs have caused a large number of human and material losses, but hazard-based data collection and implementation of lake monitoring programs are scarce in this region.

This study focuses on lake and glacier area changes in the little studied Cordillera Vilcabamba (Cusco and Apurimac, Peru). We present a multi-temporal and semi-automatic framework based on the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Snow Index (NDSI), using Landsat TM 5 and OLI 8 images in the period 1991-2014. Our results corroborate a strong glacier area shrinkage of 51% between 1991 (201.0 km²)

and 2014 (98.9 km²). In the same period, the number of lakes (total lake surface) has increased from 247 (4.1 km²) in 1991 to 329 (5.2 km²) in 2014, which corresponds to an accelerated growth of 0.8% (0.6%) from 1991 to 2001 and 2.3% (1.7%) from 2010 to 2014, respectively. The strongest lake growth has been identified in high-altitudinal areas (4400-4800 masl) particularly for the last period (2010-2014), which might be correlated to current deglaciation processes and changes in geomorphologic features. The lake discrimination and potential hazard analysis were performed in a four-step protocol, primarily based on lake surface variations and a possible GLOF exposure of villages downstream. Further criteria were applied, including (a) glacier-lake distance, (b) dam type, (c) formation period, (d) critical slopes and (e) volume estimations. A total of 52 "indicator lakes" have been identified, of which 13 glacier lakes are connected to 15 exposed villages down valley. Two of these lakes have been classified in a low-medium potential hazard level and three in a medium-high level.

Our study results have several implications for future research and water management. Ongoing glacier shrinkage and lake development generate serious hazard and potential risk conditions. Nonetheless, there are opportunities for (integrated) future water management considering the growing need for new reservoirs, for example, for growing agriculture and hydropower water demand in the region. The presented methodology facilitates an effective and extended hazard analysis which should be further corroborated with additional in-situ data and criteria applied to other glaciated mountain ranges. Future research should focus on further development of a comprehensive, continuous and standardized hazard and risk analysis, in connection with glacier lake monitoring.

Keywords: *Tropical Andes, glacier shrinkage, GLOF, Cordillera de Vilcabamba, remote sensing*

INTRODUCCIÓN

En diferentes regiones de alta montaña del mundo se ha registrado un intenso retroceso glaciar en las últimas décadas que ha sido atribuido principalmente a los efectos del cambio climático. Este desarrollo está alterando los regímenes hidrológicos y contribuyendo a una cada vez más rápida formación y crecimiento de lagunas glaciares por el mayor aporte de agua proveniente de los deshielos y la topografía expuesta, como depresiones en el relieve y morrenas, que deja el retroceso glaciar (Haerberli, Schaub y Huggel, 2016; Haerberli et al., 2013; Hegglin y Huggel, 2008; Harrison et al., 2006). Además, la fusión de hielo y permafrost brindan nuevas condiciones de amenaza al dejar depósitos de bloques y detritos sueltos, y cambiar la geometría de las masas glaciares y laderas de roca congeladas, ahora más propensas a la fragmentación y posible caída de bloques de roca y hielo (Haerberli et al., 2013; Haerberli, Schaub y Huggel, 2016).

En este contexto, una amenaza muy inminente es la representada por el flujo por el desborde violento de una laguna glaciar (GLOF, por sus siglas en inglés), las cuales consisten en la súbita descarga de un gran volumen de agua y material de detritos y escombros arrastrados y

transportados valle abajo. Los factores que pueden originar un GLOF son diversos: caídas de avalanchas de nieve, hielo y roca; erosión parcial y/o colapso del dique morrénico; sismos o repentinos aportes significativos de agua debido a intensas lluvias o drenaje de agua de lagunas próximas que se encuentren en altitudes superiores (Haerberli et al., 2013; Bolch et al., 2012).

A nivel global, los desastres naturales de origen glaciar y especialmente los GLOFs han originado eventos catastróficos con importantes pérdidas humanas y materiales (Haerberli et al., 2013; Hoffmann y Weggenmann, 2013; Worni, Huggel y Stoffel, 2012; Booth y Punt, 2012; Jain et al., 2012; Mergili et al., 2012; Bajracharya y Mool, 2009; Harrison et al., 2006). En los Andes del Perú se han registrado repetitivos eventos GLOF en las últimas décadas con consecuencias en algunos casos devastadoras (Carey, 2010; Portocarrero, 2014). Un evento simbólico por la magnitud de su impacto es el GLOF de 1941 en la Cordillera Blanca que mató, de acuerdo a una estimación corregida, a unas 1800 personas en la ciudad de Huaraz (Wegner, 2014).

El siguiente estudio se centra en la Cordillera de Vilcabamba (sur del Perú) en la cual los GLOFs no han alcanzado un impacto tan destructivo como en la Cordillera Blanca; sin embargo, futuros eventos podrían darse con efectos considerables sobre las poblaciones aledañas y la infraestructura. En las escasas investigaciones que existen en la región, se han identificado algunas lagunas glaciares potencialmente peligrosas. Una de ellas es la laguna Sisaypampa, también conocida como laguna Salcantay, ubicada en el río Orcospampa, valle del Aobamba. Pese a que esta laguna está contenida en una depresión de roca granítica, se encuentra rodeada por un terreno escarpado y material morrénico inestable; además, tiene un borde libre pequeño y un volumen potencial máximo de 2.5×10^6 m³ (Buis, 2014; Huggel, Käab y Haerberli, 2003; INGEMMET, 1999). Además, en la cuenca del Sacsara, se considera a la laguna Hanpi K'ocha como muy peligrosa. Criterios usados para esta evaluación son su pequeño borde libre (1-5 m), su gran volumen de aproximadamente 4.3×10^6 m³ y las altas pendientes de las laderas cubiertas de glaciar y con roca expuesta por encima de la laguna (Giráldez et al., 2012). Estos estudios resaltan la necesidad de realizar más estudios incluyendo una evaluación de la potencial amenaza de lagunas de alta montaña y variables sociales.

En ese sentido, el objetivo principal del presente estudio es identificar nuevas lagunas formadas a través de la construcción de un modelo semiautomático que funcione de manera iterativa, y detectar a aquellas que representen un mayor potencial de amenaza definida mediante parámetros de superficie, período de formación, tipo de dique, distancia al glaciar, pendiente de posibles áreas de fallo glaciar y canal de drenaje aguas abajo, y volumen. Nuestro segundo propósito es analizar la evolución de la superficie glaciar y evaluar la importancia del aporte del derretimiento glaciar en la formación y/o crecimiento de lagunas. Adicionalmente, el tercer propósito es identificar centros poblados expuestos con la finalidad de generar recomendaciones para que se realicen futuros estudios en zonas priorizadas con mediciones y monitoreos en las lagunas que puedan representar una mayor amenaza.

ÁREA DE ESTUDIO

La Cordillera de Vilcabamba es un tramo de la Cordillera Oriental Andina que se ubica entre los 13°10' y 13°37' latitud sur, y entre los 72°20' y 73°15' longitud oeste, en las regiones de Cusco y Apurímac al sur del Perú (Figura 1). Se encuentra en un área de transición entre los Andes y la Amazonía (Suarez et al., 2013). Con casi 100 km² representa la tercera región glaciaria más grande del Perú, la cual corresponde al 8% del área glaciaria nacional y 4% del área glaciaria tropical del mundo.

La región de Vilcabamba se encuentra en una situación de combinación de régimen tropical y subtropical. Con temperaturas promedio que oscilan entre 14 °C y 17 °C y una alta variabilidad espacio-temporal de precipitación anual entre 500 mm (partes altas, hacia el sureste al altiplano) y 2000 mm (partes bajas, hacia el noreste a la Amazonía).

Se caracteriza por tener un relieve accidentado y elevado con un rango altitudinal de 800 a 6264 msnm, siendo el nevado Salcantay el pico más elevado (Carlotto et al., 1999). En la microcuenca Aobamba los taludes son muy inclinados y la ocurrencia de un GLOF mediano-grande podría afectar al cauce de toda la cuenca, habiendo material disponible para un nuevo flujo a lo largo de estos taludes y en las faldas del Salcantay (Buis, 2014). Precisamente en la quebrada Aobamba se registró un GLOF el 12 de julio de 1996. La causa más probable fue la caída de masa glaciaria sobre la laguna Sisaypampa en el río Orcospampa, en la vertiente norte del nevado Salcantay. En este evento murieron cinco personas. El 12 de marzo de 1998 y el 22 de

noviembre de 1998 se originaron un nuevos GLOFs en el río Orcospampa con características posiblemente similares al de 1996, la caída de masas glaciarias sobre la misma laguna, transportando el material morrénico existente (Carlotto et al., 1999; INGEMMET, 1999).

Los distritos de Vilcabamba y Santa Teresa son los que cubren una mayor extensión de la Cordillera de Vilcabamba. Son distritos de bajos recursos económicos con ingresos familiares mínimos de 181 y 366 Nuevos Soles (aproximadamente 54 y 110 dólares americanos) per cápita, respectivamente (PNUD, 2013). En Santa Teresa, el 70% de los aproximadamente 10,000 habitantes es considerado pobre, el 42% de los niños menores de 5 años indica una malnutrición crónica, el 95% no tiene acceso a agua potable para consumo humano, el 60% no tiene electricidad y el 29% no cuenta con los servicios adecuados de saneamiento (MAXIMIZE, 2011). Dada esta alta vulnerabilidad, un desastre natural, tal como un GLOF, podría constituir un alto riesgo para la población y agravar su subsistencia a largo plazo.

DATOS

Se trabajó con imágenes Landsat TM 5 y OLI 8 (path 004/005, row 069) correspondientes a la época seca de los años 1991, 2001, 2010 y 2014. Se optó trabajar con estas imágenes distribuidas de forma gratuita por la mediana resolución espacial (30 m), temporal (16 días), radiométrica (8-16 bit), disponibilidad histórica (desde 1985) y la amplia cobertura territorial (185 km x 172 km) (NASA, 2016) estableciendo una serie de criterios de selección (Tabla 1).

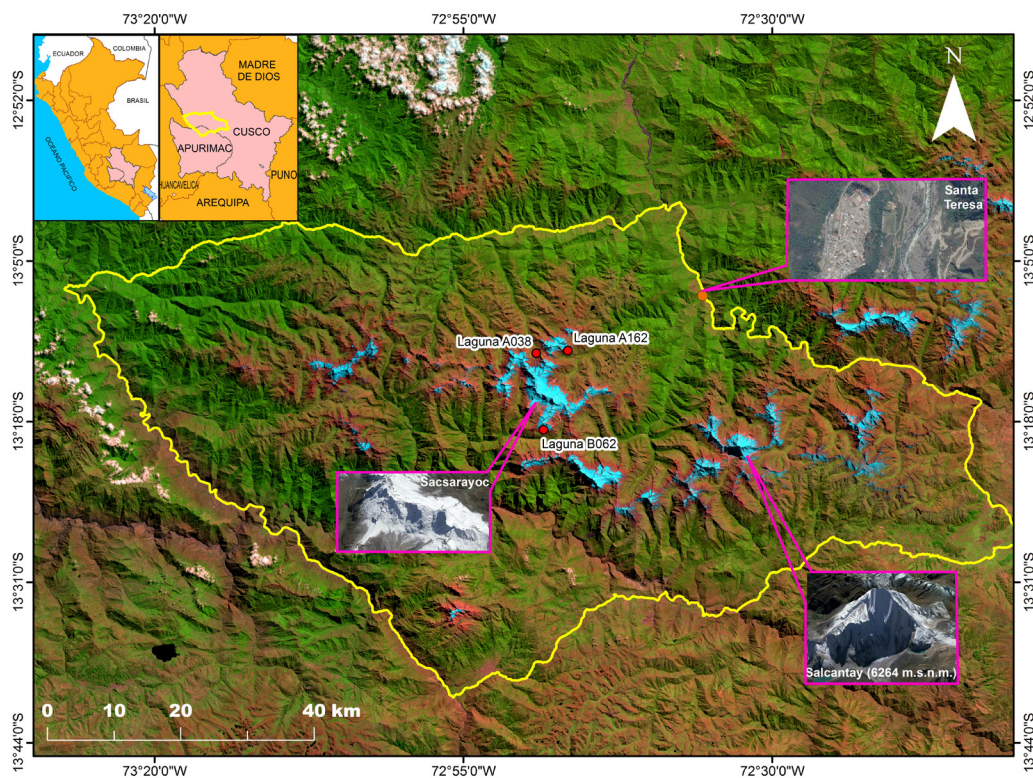


Figura 1: Mapa de ubicación de la Cordillera de Vilcabamba. En color amarillo se encuentra delimitada la extensión de la Cordillera de Vilcabamba (UGRH). También se puede visualizar la ubicación de las lagunas A038, A162 y B062, que son aquellas identificadas con el mayor potencial de amenaza (Tabla 3). Imagen base: Landsat 8 OLI, composición de bandas (7-5-4), mosaico 29.05.2014 y 05.06.2014.

Se emplearon las escenas Landsat TM 5 y OLI 8 originales debido a que el nivel de corrección geométrica que tienen estas imágenes (L1T) no fue superado por el ensayo de ortorrectificación manual aplicando 103 puntos de control de terreno (GCP), ni por el ajuste automático mediante múltiples puntos de enlace (*tie points*) que ofrece

p. ej. el módulo Autosync del programa Erdas Imagine. Un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) fue proporcionado por el producto libremente accesible SRTM (resolución espacial de 90 m), versión 3 corregida con vacíos rellenos (*void-filled*) (USGS, 2013).

CRITERIOS	PROPÓSITO
Escenas correspondientes a la temporada seca: junio- septiembre	Realizar una delimitación precisa de los bordes glaciares, evitando confusión de nieve temporal con hielo glaciar. Menor contenido de humedad y nubosidad en la atmósfera reduce alteraciones en la radiometría de la imagen.
Mínimo porcentaje de cobertura de nubosidad en las escenas	Inferior al 15% en el área estudiada. Se reduce la probabilidad de confusión en la clasificación y revisión automática y manual de las áreas glaciares y lagunares.
Calidad/Nivel de corrección9/L1T	Las escenas cuentan con el mayor nivel de corrección geométrica y radiométrica automáticas.

Tabla 1. Criterios de selección de escenas Landsat TM 5 y OLI 8.

METODOLOGÍA

Delimitación de áreas lagunares y glaciares

El procedimiento general comprendió la identificación de áreas lagunares a través de la construcción de un modelo semiautomático (Figura 2), basado en el Índice Normalizado Diferencial del Agua (NDWI, por sus siglas en inglés). Luego, la remoción de sombras e identificación de lagunas erróneamente clasificadas se realizó a través de un mapa de pendientes e imágenes sombreadas generadas a partir del DEM (Huggel et al., 2002). Este último se realizó dentro del marco de una corrección manual de las áreas lagunares. La información lagunar obtenida para el año 2010 se contrastó con el inventario de lagunas de la ANA (2012a) que se basó en imágenes satelitales de los años 2009 y 2010.

Para discriminar las áreas lagunares de otros tipos de superficie se empleó un cociente de bandas que se basa en el principio de contrastar las bandas con la máxima y mínima reflectancia del agua. Siguiendo la metodología aplicada por Huggel et al. (2002), Frey et al. (2010) y Hanshaw y Bookhagen (2014), se utilizó el índice de bandas NDWI

$$(NIR-B)/(NIR+B)$$

donde *NIR* corresponde al infrarrojo cercano (banda 4 en Landsat 5 y banda 5 en Landsat 8) y *B* corresponde al azul (banda 1 en Landsat 5 y banda 2 en Landsat 8).

Por lo general, las áreas lagunares presentan valores NDWI bajos, oscilando entre -0.60 y -0.85 (Huggel et al., 2002). Sin embargo, en el área de estudio se encontraron valores más altos de reflectividad. El umbral mínimo de las escenas TM 5 se fijó en -0.85 y el máximo en -0.40. Por otra parte, las escenas OLI 8 presentaron valores diferentes para las áreas lagunares, con umbrales incluso más elevados entre -0.13 y +0.04 (Tabla 2). La mayor resolución radiométrica y la mayor resolución espectral (mayor cantidad de bandas con menor anchura) que ofrece Landsat 8 son factores que influyen en los rangos de umbrales diferenciados en relación a las Landsat 5.

Las áreas glaciares fueron identificadas de forma similar. Se aplicó el Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés). Seguidamente, se removieron los bordes lagunares clasificados erróneamente como glaciares y se realizaron las correcciones manuales (adicción/remoción de vectores) con el empleo de una imagen de sombras como se describió anteriormente (Hanshaw y Bookhagen, 2014; Silverio y Jaquet, 2005).

No existe un consenso sobre cuáles son las bandas que ofrecen mejores resultados en la identificación de superficies glaciares. Por ello, se recomienda hacer pruebas en la zona de estudio para determinar las bandas óptimas (Hanshaw y Bookhagen, 2014). Estudios realizados sugieren emplear las bandas TM 3/5, 4/5 o 2/5 (Hanshaw y Bookhagen, 2014; Silverio y Jaquet, 2005). En cambio, no se han encontrado estudios que aborden los análisis NDSI

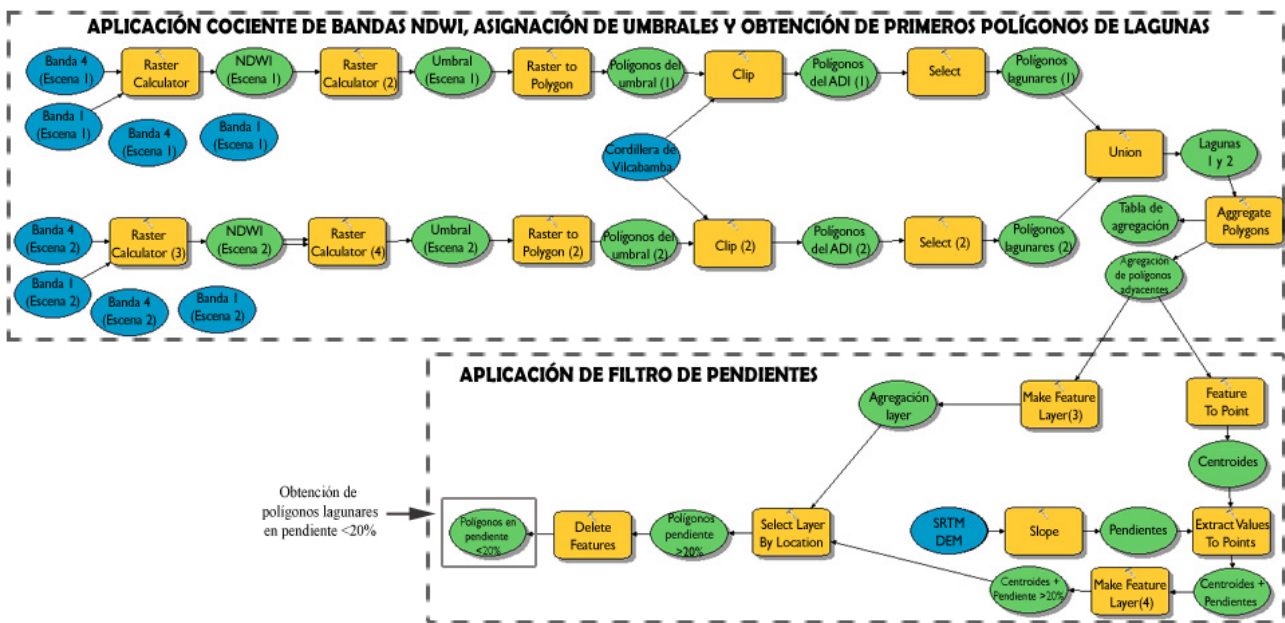


Figura 2: Modelo semiautomático empleado para la delimitación de superficies lagunares, elaborado en ArcGis 10.1.

ESCENAS LANDSAT	Fecha	Nubosidad (%)	NDWI	NDSI
LT50040691991182CUB00	01/07/1991	10	-0.70 a -0.45	≥ +0.40
LT50050691991189CUB00	08/07/1991	0	-0.75 a -0.46	≥ +0.35
LT500406920011225CUB02	13/08/2001	14	-0.82 a -0.40	≥ +0.45
LT500506920011216CUB02	04/08/2001	21	-0.82 a -0.40	≥ +0.46
LT50040692010186CUB00	05/07/2010	10	-0.85 a -0.40	≥ +0.40
LT50050692010193CUB00	12/07/2010	19	-0.85 a -0.40	≥ +0.40
LC80040692014149LGN00	29/05/2014	12	-0.13 a 0.04	≥ +0.40
LC80050692014156LGN00	05/06/2014	12	-0.13 a 0.02	≥ +0.35

Tabla 2. Umbrales NDWI/NDSI Landsat TM 5 (1991, 2001 y 2010) y OLI 8 (2014). Nótese que los valores de los píxeles NDWI en las imágenes TM son más bajos que en las OLI. En cambio, los valores de los píxeles NDSI son similares. También se incluye porcentaje de nubosidad de las escenas.

en imágenes Landsat 8. El cociente de bandas NDSI se expresa

$$(G-SWIR)/(G +SWIR)$$

donde *G* corresponde a la banda verde (banda 2 en Landsat 5 y banda 3 en Landsat 8) y *SWIR* al infrarrojo cercano de onda corta (banda 5 en Landsat 5 y banda 6 en Landsat 8). Se optó trabajar con las bandas Landsat 5 recomendadas por el estudio de Silverio y Jaquet (2005); mientras que, para la elección de las bandas OLI de Landsat 8 se realizaron ensayos con resultados consistentes para las bandas seleccionadas. Los números digitales de los píxeles correspondientes a las regiones glaciares se establecieron

con un rango de umbral mayor o igual a +0.35, tanto para las escenas TM y OLI (Tabla 2). Los filtros que se aplicaron fueron la eliminación de áreas glaciares superpuestas a las áreas clasificadas como lagunas, seguido de la eliminación automática de los polígonos con superficies inferiores a los $5.4 \times 10^3 \text{ m}^2$ (6 píxeles). Se estableció este umbral para no considerar los fragmentos relativamente pequeños de hielo que no pertenecen al glaciar principal.

Las áreas glaciares se contrastaron con el estudio multitemporal de Suarez et al. (2013) y con el inventario de glaciares (ANA, 2012b) realizado con imágenes Landsat y ASTER de los años 2009 y 2010.

Obtención de parámetros lagunares

A partir de los polígonos de lagunas se derivaron los parámetros de área, período de formación y distancia laguna–glaciar empleando las herramientas de geoprocésamiento del entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica). El tipo de dique de las lagunas y la identificación de centros poblados expuestos se determinaron a partir de la visualización directa de imágenes en Google Earth Pro. Se empleó la herramienta perfil de elevación de Google Earth Pro para el cálculo de la pendiente media de las laderas próximas a las lagunas con potencial amenaza media-alta.

Por otro lado, la estimación de la profundidad y volumen de lagunas a partir de imágenes satelitales representa un reto y una necesidad para poder cuantificar el volumen del agua como reservorio de agua potable y ante un eventual desborde. Con este propósito se han desarrollado estudios basados en modelos empíricos para realizar un cálculo aproximado de estos parámetros (Haeberli y Schweizer, 1988; Huggel et al., 2002).

Para la estimación de la profundidad media de las lagunas se aplicó la metodología de parametrización de Haeberli y Schweizer (1988). Para ello, se seleccionaron lagunas con un dique morrénico lateral claramente identificable en Google Earth, luego se realizó el siguiente cálculo

$$z_c = w/(4 \pm 1)$$

donde z_c corresponde al espesor promedio en la línea central de flujo de un glaciar de valle y w , al ancho de hielo.

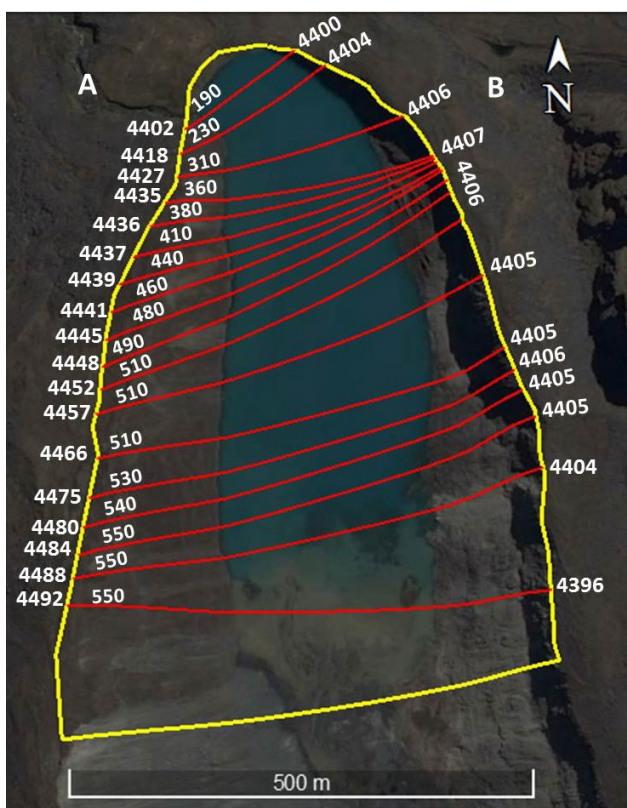


Figura 3. Datos empleados para la estimación de la profundidad de acuerdo a la metodología de Haeberli y Schweizer (1988), aplicado a la laguna A038 (ubicada en la lengua norte del glaciar Sacsarayoc). En amarillo: delimitación de dique morrénico. En rojo: transectos para medir ancho de hielo (“w” en metros) sobre cada transecto. A: altitud absoluta del dique en ambos extremos del transecto. B: altitud media absoluta del espejo de agua en el recorrido del transecto. Fuente: Imagen Astrium, Google Earth Pro.

El z_c está definido por un valor empírico de 3 a 5, donde 3 representa al valor límite de la profundidad máxima de la antigua lengua glaciar y laguna, hoy en día probablemente mayor debido al proceso de sedimentación del cuerpo acuático. El proceso de obtención de w se muestra con detalle en la Figura 3.

El espesor promedio en la línea central de flujo se sustrajo a la diferencia entre las altitudes absolutas del borde superior del dique (límite superior de la lengua glaciar anterior) y el espejo de agua actual, obteniendo la profundidad de la laguna. El volumen de estas lagunas se estimó a partir de los datos de profundidad y área.

Otra alternativa para la estimación de la profundidad y el volumen ha sido descrita por Huggel et al. (2002). A partir de la data in situ sobre área lagunar, volumen y profundidades se estableció una relación empírica entre la profundidad y el área

$$D = 0.104 A^{0.42}$$

donde D corresponde a la profundidad y A al área.

La precisión de los resultados es discutible (véase la sección de “Evaluación de parámetros y análisis de la amenaza” abajo). Cook y Quincey (2015) analizan la aplicación de la fórmula de manera genérica hallando un coeficiente de determinación bajo ($r^2 = 0.38$) que indica una alta variabilidad y por ende dispersión significativa de los cálculos hallados mediante esta técnica de escalado.

Análisis de la potencial amenaza de lagunas y centros poblados expuestos

Para estimar la potencial amenaza de lagunas, múltiples parámetros referidos a su geometría, material, volumen y ubicación deben ser tomados en cuenta (Bolch et al., 2012; Huggel et al., 2002). Sin embargo, dentro de la metodología semiautomática presentada en este estudio, se plantea una clasificación de la potencial amenaza de lagunas basada en la variación de la superficie como parámetro con mayor grado de definición a partir del sensoramiento remoto, a la cual sigue un análisis más detallado con otros parámetros (Tabla 3).

En una primera etapa se identificaron las lagunas existentes en los años 1991-2014 y los cambios de superficie de cada laguna. La segunda etapa consistió en discriminar lagunas indicadores (lagunas con un umbral de crecimiento mínimo) de las (aquí denominadas) lagunas residuales. En esta etapa fueron establecidos criterios de cambio relativo, cambio absoluto y formación de nuevas lagunas con una extensión mínima (Tabla 3).

Dado que las lagunas indicadores pueden representar un potencial de amenaza, en la tercera etapa se analizaron las conexiones existentes entre estas lagunas y los centros poblados expuestos. Mediante Google Earth Pro se visualizó la orientación de las laderas y las posibles rutas de recorrido de flujos aluviónicos, detectándose centros poblados que se ubican aguas abajo de estas lagunas. Asimismo, esta información se corroboró con un estudio desarrollado por Buis (2014), en el que se incluyeron modelamientos de flujos aluviónicos en el distrito de Santa Teresa (Tabla 3). De esta manera, se identificaron las lagunas que tenían un nivel de conexión con centros poblados, al encontrarse al

Etapa	Objetivo	Parámetro	Criterios	Observaciones	Conteo
1	Detección semi-automática de lagunas en el Vilcabamba		NDWI DEM (SRTM) Sombreado Área mínima (1píxel/900 m ²) para detección de lagunas	Identificar lagunas existentes en los años 1991, 2001, 2010 y 2014.	329 (año base 2014)
2	Lagunas indicadores	Área	Cambio relativo ¹ ($\geq 100\%$) Cambio absoluto ($\geq 5.4 \times 10^3$ m ²) Nuevas lagunas ² ($\geq 5.4 \times 10^3$ m ²)	Lagunas por encima de los umbrales de crecimiento establecidos en los criterios.	52
3	Centros poblados expuestos (CP)	Conexión laguna-CP	Orientación de pendientes con cabeceras de cuenca integradas por lagunas indicadores.	CP ubicados en el interior de quebradas o en el cono de deyección.	13
4	Lagunas potencial amenaza baja-mediana	Área Distancia laguna-glaciar Tipo de dique Período de formación	Cambio absoluto ($>5.4 - \leq 20.0 \times 10^3$ m ²) ≤ 500 m Morrénico, rocoso o mixto. A partir del 2001	Lagunas con crecimiento medio Nueva laguna con crecimiento medio ($> 5.4 - \leq 20.0 \times 10^3$ m ²)	2
	Lagunas potencial amenaza mediana-alta	Área Distancia laguna-glaciar Tipo de dique Pendiente crítica del canal de avalancha Pendiente crítica del área de desprendimiento de rocas/glaciares Período de formación Volumen (a partir de la profundidad y área)	Cambio absoluto ($>20.0 \times 10^3$ m ²) ≤ 100 m Morrénico $\geq 11^\circ$ $\geq 20^\circ$ A partir del 2001 $\geq 2.00 \times 10^6$ m ³ $\geq 2.00 \times 10^6$ m ³	Lagunas de mayor crecimiento. Pendiente media del canal de avalancha glaciar-laguna Pendiente media de laderas con hielo y/o roca Nueva laguna con crecimiento acelerado ($>20.0 \times 10^3$ m ²). Escalado empírico (Huggel et al. 2002) Parametrización empírica (Haerberli y Schweizer 1988)	3

Tabla 3. Criterios para identificar lagunas indicadores, las que representan una potencial amenaza baja-media y mediana-alta, y centros poblados expuestos.

¹ Lagunas que luego de haber incrementado su superficie ($\geq 100\%$). Su extensión al año 2014 es igual o superior a los 5.4×10^3 m².

² Son las nuevas lagunas formadas en el período 2010-2014, con una extensión superior a 5.4×10^3 m².

interior de quebradas, valles y conos de deyección. Estas lagunas pasaron a la última fase del análisis, la etapa 4.

En la etapa 4 se derivaron las lagunas con potencial amenaza baja-mediana y mediana-alta. En ambos casos se definieron criterios de incremento de superficie mínimos: para un potencial de amenaza baja-mediana de $>5.4 \times 10^3$ m² a $\leq 20.0 \times 10^3$ m², y para determinar un potencial de amenaza mediana-alta $>20.0 \times 10^3$ m². Las lagunas con potencial amenaza baja-mediana cumplieron con un umbral de distancia al glaciar. Además, se incluyeron otros parámetros como tipo de dique y período de formación reciente como criterios adicionales pero no excluyentes (Tabla 3).

La identificación de lagunas con potencial amenaza mediana-alta requirió de una evaluación más profunda que incorporó parámetros adicionales centrados en pendientes críticas y volumen de agua (Tabla 3).

RESULTADOS

Evolución de la cobertura glaciar

El área glaciar de la Cordillera de Vilcabamba se ha reducido en un 51% entre 1991 y 2014. Nuestros resultados indican que en 1991 el área glaciar era de 201 km², reduciéndose a 144.9 km², 108.4 km² y 98.9 km²

en los años 2001, 2010 y 2014, respectivamente. La tasa de reducción anual del área glaciaria fue de 2.5% en los periodos 1991-2001 y 2001-2010, desacelerándose a un 1.8% en el periodo 2010-2014 estando todavía por encima del promedio nacional anual de aproximadamente 1.1% (ANA, 2014)

El retroceso glaciario registrado en la Cordillera de Vilcabamba concuerda con los cambios observados en los glaciares de casi todas partes del mundo, y a nivel regional en los Andes Tropicales (ANA, 2014; Hanshaw y Bookhagen, 2014; Salzmann et al., 2013; Vuille et al., 2008b; Silverio y Jaquet, 2005; Kaser y Osmaston, 2002). Los estudios realizados en los Andes Tropicales indican que el ascenso de la temperatura 0.13 °C/década registrado entre 1950-2010 es la principal causa del retroceso glaciario (Vuille et al., 2015). Aunque también señalan que otros posibles factores influyentes son el incremento de la humedad y cambios en patrones de la precipitación y la cobertura de nubes así como la ocurrencia de eventos El Niño fuertes en las últimas décadas (1982/83, 1997/98 y finalmente 2015/16, el último todavía sin mayores estudios) (Rabatel et al., 2013; Vuille, Kaser y Juen, 2008a).

En estudios previos en la Cordillera de Vilcabamba, Suarez et al. (2013) concluyeron que entre 1991 y 2011 el área glaciaria se redujo de 220.30 km² a 129.40 km² (pérdida total de 41% correspondiente a un promedio de 2.1% / año); mientras que, en el inventario elaborado por la ANA (2012b) se obtuvo una superficie de 129.15 km² para el 2009.

Nuestros hallazgos y los obtenidos por Suarez et al. (2013) evidencian una disminución de la cobertura glaciaria, aunque existen diferencias entre los años y estimaciones de las extensiones glaciares en los tres estudios. Esto se debe posiblemente, entre otros, a los criterios y umbrales

asumidos para la clasificación, particularmente la selección del umbral y edición manual para definir las áreas glaciares, las condiciones atmosféricas en las imágenes, y confusiones restantes en la clasificación con sombras.

Evolución de la cobertura y cantidad de lagunas

El mapeo de lagunas señala un incremento del número y área de lagunas. La cantidad (superficie) de lagunas que se identificaron para cada año fueron 247 (4.1 km²), 268 (4.3 km²), 295 (4.8 km²) y 329 (5.2 km²) correspondientes, en ese orden, a los años 1991, 2001, 2010 y 2014. Además, la tasa anual de formación de nuevas lagunas se ha acelerado en el último periodo de 0.8% (1991-2001) a 2.3% (2010-2014). Asimismo, ha habido un incremento anual sostenido de la superficie lagunar de 0.6% (1991-2001) a 1.7% (2010-2014).

El mayor número de lagunas en casi todos los años de estudio se ubican en el rango altitudinal de 4000 a 4400 msnm; a excepción del último periodo donde el número de lagunas entre los 4400 y 4800 msnm (145) superó al número de lagunas que se encontraban entre los 4000 y 4400 msnm (Figura 4). Esto se debe a que el 61% (50) de las nuevas lagunas que se han formado en el periodo total del estudio entre 1991 y 2014, se encuentran entre los 4400 y 4800 msnm; mientras que, un 28% (23) entre los 4000 y 4400 msnm (Tabla 4). Además, el 79% de estas lagunas recién formadas son principalmente pequeñas con una superficie igual o inferior a los 5.0x10³ m². Cabe mencionar que también existen nuevas lagunas con tamaño significativo, en total siete lagunas con una superficie superior a los 15.0x10³ m², de las cuales cinco se han formado en el rango de 4400 a 4800 msnm, y una entre los 4800 y 5200 msnm (Tabla 4).

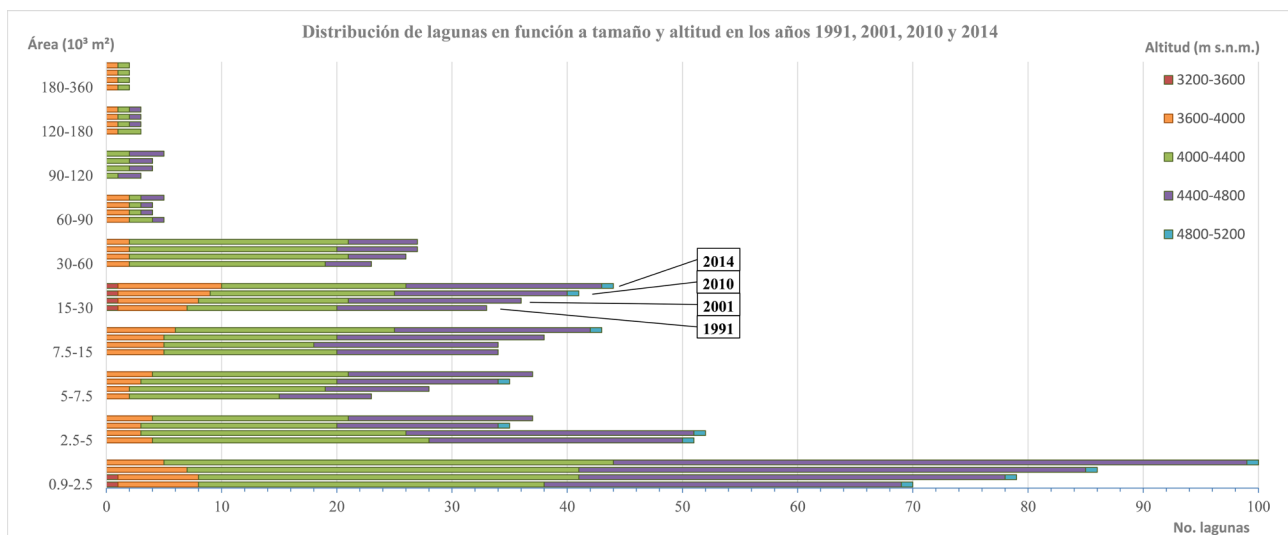


Figura 4: Número de lagunas de acuerdo a rangos de superficie y altitud entre 1991-2014. Cada clase de área lagunar (cuatro barras horizontales) corresponde, desde abajo hacia arriba, a los años 1991, 2001, 2010 y 2014.

Área (10 ³ m ²) / Altitud (msnm)	0.9-2.5	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-15.0	15.0-30.0	30.0-60.0	60.0-90.0	90.0-120.0	Total
4800-5200	1	2	0	1	1	0	0	0	5
4400-4800	34	5	5	1	2	1	1	1	50
4000-4400	18	3	0	1	1	0	0	0	23
3600-4000	2	0	0	2	0	0	0	0	4
<i>Total</i>	<i>55</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>82</i>

Tabla 4: Distribución de nuevas lagunas por rangos de altitud y superficie determinadas entre 1991-2014.

Nuestros cálculos de cantidad y superficie de lagunas del año 2010 se aproximan a las estimaciones realizadas en el Inventario Nacional de Lagunas (ANA, 2012a), principalmente, en referencia a la cantidad de lagunas. En base a información satelital de los años 2009 y 2010, en este inventario, se registraron 284 lagunas y una superficie de 5.0 km². El mayor rango de diferencia entre los cálculos de superficie se debe posiblemente a las superficies mínimas de digitalización establecidas en cada estudio (200 m² en el inventario y 900 m² en el presente estudio). Además depende, entre otros, de las diferentes metodologías en la aplicación del NDWI, alteraciones radiométricas en las imágenes multitemporales y confusiones relacionadas (véase arriba) a las características atmosféricas y presencia de sombras en las escenas.

La formación de nuevas lagunas a mayores altitudes, principalmente entre los 4400-4800 msnm (Tabla 4) sugiere que el aporte del deshielo ha sido un factor importante para el desarrollo de las lagunas, aunque más años de estudio son necesarios para corroborar esta información. Esto puede explicarse por cambios en las características geomorfológicas (embalses naturales formados por depresiones y morrenas) que genera el retroceso glaciar (Haeberli et al., 2016). El desarrollo de un mayor número de nuevas lagunas pequeñas (900–5000 m²), indica que estas pueden encontrarse recién en una fase de desarrollo inicial, creciendo aceleradamente a pesar de la actual disminución de la tasa de reducción glaciar. Esta relación sugiere un tiempo de respuesta atrasado entre el cambio de masa glaciar y la consecutiva formación de lagunas. Conforme va disminuyendo la extensión glaciar descubriendo menor área y aportando menos agua de deshielo en el futuro, el crecimiento de lagunas podría también llegar a un punto de inflexión y luego disminuir. Dado que el aporte pluvial es una de las principales fuentes de alimentación de las lagunas de la Cordillera de Vilcabamba (ANA, 2012a), sería urgente contrastar y analizar la data existente para determinar cambios en los patrones de precipitación y en la línea promedio de cambio a fase sólida y líquida.

Evaluación de parámetros y análisis de la amenaza

Se identificaron 52 lagunas que cumplieron con los criterios críticos establecidos de incremento de superficie, a estas lagunas se las denomina “lagunas indicadores” (Tabla 3). Doce lagunas (con una superficie mínima de 5.4x10³ m² en el 2014) ampliaron su área en un 100% o más

con respecto al área que registraron en 1991, 45 lagunas crecieron en un mínimo de 5.4x10³ m², y se ha formado una nueva laguna en el período 2010-2014 con una extensión de 6.3x10³ m². El 17.3% de estas lagunas (9) tienen un tamaño medio (>50.0x10³ m² y <100.0x10³ m²), y el 13.5% son de gran tamaño (>100.0x10³ m²) (Anexo 1).

El análisis de conexión con centros poblados indica que trece de las lagunas indicadores se encuentran vertiente arriba de centros poblados que se ubican en el interior de las potenciales rutas de recorrido de los flujos aluviónicos. Además, dos de estas lagunas representan una potencial amenaza baja-mediana, las lagunas codificadas como B067 y B081; y tres lagunas, una potencial amenaza mediana-alta, las lagunas A038, A162 y B062 (Tabla 3 y Anexo 1).

Las lagunas B067 y B081 fueron clasificadas como lagunas con potencial amenaza baja-mediana por encontrarse dentro de los umbrales medios de incremento de superficie y distancia al glaciar (Tabla 3). La laguna B067 ha crecido en 16,200 m² entre 1991 al 2014, y se ubica a 180 m de distancia al glaciar. De otro lado, la laguna B081 es una nueva laguna formada en el período 2001-2010, ha crecido 8108 m², y aún está en contacto con el glaciar. Ambas se encuentran represadas por un dique de lecho rocoso (Anexo 1).

Las lagunas con potencial amenaza mediana-alta son las que superaron el umbral máximo de crecimiento (>20.0x10³ m²), y que además cumplen con uno o más de los otros parámetros críticos de amenaza (Tabla 3). Estas son las lagunas codificadas como A038, A162 y B062 (Anexo 1). La laguna A162 que aún se encuentra en contacto con el glaciar y la laguna B062 (Figura 5) que se ubica a 35 m del glaciar, registraron el mayor incremento de superficie (45.0x10³ m² y 65.7x10³ m², respectivamente). Además, son lagunas relativamente nuevas formadas en el período 2001-2010.

Las pendientes registradas en las laderas de los alrededores de las lagunas A162 y B062 son moderadamente a fuertemente inclinadas. Las dos laderas del canal de avalancha de la laguna A162 indican pendientes medianamente a fuertemente inclinadas de 18.6° y 20.6°. Además, se identificaron dos áreas con presencia de agrietamientos que registraron pendientes de 18.7° y 32.7°. La pendiente media del canal de avalancha de la laguna B062 se calculó en 25.5° y la zona donde se visualizan agrietamientos, que es prácticamente en la extensión de toda la ladera, se estimó una pendiente de 25.6°.

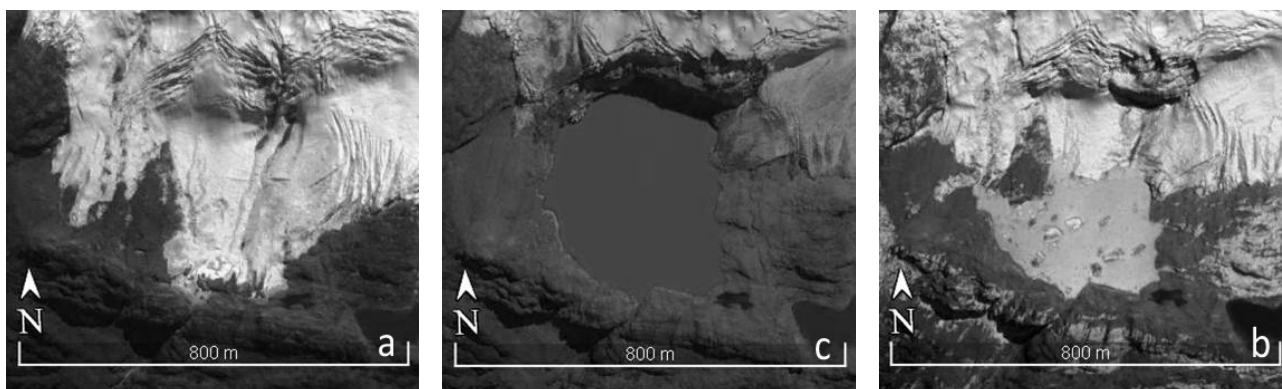


Figura 5. Formación y expansión de la laguna B062 y retroceso de la lengua sureste del glaciar Sacsarayoc. (a) 2007 (b) 2011 (c) 2014. Fuente de las imágenes: Digital Globe (a y b) y Astrium (c), Google Earth Pro.

El cálculo de profundidad según la metodología de Haeberli y Schweizer (1988) se aplicó a la laguna A038, ubicada en las lengua norte del nevado Sacsarayoc. Las profundidades (volúmenes) mínima y máxima obtenidas para la laguna A038 fueron de unos 42 m ($7.1 \times 10^6 \text{ m}^3$) y 102 m ($17.2 \times 10^6 \text{ m}^3$). Contrastando estos resultados con la metodología de Huggel et al. (2002), se evidencia una amplia diferencia con una profundidad (volumen) de 16 m ($2.7 \times 10^6 \text{ m}^3$). Cabe destacar que los resultados presentados brindan una dimensión de la profundidad y volumen sin determinar valores con mayor precisión. Dentro y entre los métodos de parametrización de profundidad (Haeberli y Schweizer, 1988) y del escalado de área-profundidad (Huggel et al., 2002) existe una variabilidad de resultados considerable. Sobre todo el método de Huggel et al. (2002) brinda una aproximación rápida y eficaz para determinar la profundidad y el volumen, pero al mismo tiempo muestra un alto grado de incertidumbre (Cook y Quincey, 2015). En este contexto se debe mencionar que hasta la actualidad no existen mejores métodos de determinación de estas variables a excepción de los directos (p. ej. batimetría).

La laguna A038 también ha tenido un incremento de área por encima de los $20.0 \times 10^3 \text{ m}^2$. Si bien se encuentra a un poco más de 1 km de distancia del glaciar, la lengua glaciar ofrece un embalse natural propicio para seguir reteniendo agua proveniente del deshielo del Sacsarayoc o de precipitaciones. Además, los canales de avalancha de las laderas en torno a esta laguna presentan pendientes ligeras a medianamente inclinadas, con valores de 14.8° , 18.0° y 17.3° . Adicionalmente, se identificaron cuatro zonas con presencia de agrietamientos. Las pendientes de estas zonas indican 28.9° , 19.6° , 23.1° y 23.1° .

La laguna Sisaypampa, donde se originó el GLOF de 1996, ha tenido un crecimiento poco significativo ($2.7 \times 10^3 \text{ m}^2$). La laguna Hampi K'ocha, con una superficie constante de unos $103.5 \times 10^3 \text{ m}^2$ entre 1991 y 2014, es la más grande y peligrosa de la cuenca del Sacsara de acuerdo al estudio de Giráldez et al. (2012). Frey et al. (2016) señalan que tampoco se espera que esta laguna presente cambios significativos en su superficie a futuro. De acuerdo a los parámetros considerados, estas lagunas se categorizaron como de amenaza baja.

Estos parámetros muestran que 277 de las 329 lagunas representan una amenaza menor. Son lagunas en su mayoría pequeñas, recientemente formadas o que no han cambiado significativamente en el tiempo. Asimismo, se detectaron 52 lagunas que pueden implicar un mayor grado

de amenaza por haber evidenciado un cambio más notorio. Por ello, es necesario que estas lagunas sean estudiadas y monitoreadas. Las lagunas identificadas como las de mayor amenaza son la B062, A162 y A038 (Tabla 5). Su acelerado crecimiento en conjunto con otros factores como la proximidad al glaciar y relativa reciente formación en el caso de las dos primeras lagunas, el tipo de dique morrénico y gran volumen de agua (mínimamente superior a los $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$) en el caso de la laguna A038 generan las condiciones para un posible desembalse. Además, en las tres lagunas se identificaron pendientes críticas que sobrepasan los umbrales de 11° en el canal de avalancha (glaciar-laguna) y de los 20° en las zonas de agrietamientos susceptibles a caídas de rocas y/o desprendimiento glaciar.

Es importante remarcar que la aplicación de una metodología semiautomática basada principalmente en el incremento de la superficie, discriminó lagunas como Sisaypampa y Hampi K'ocha que mantuvieron una superficie relativamente estable, pero que por tener otras características combinadas de pendiente, proximidad al glaciar, tipo de dique, volumen, entre otros, representan un potencial de amenaza mayor. En este contexto también se debe señalar que el uso del cambio de área lagunar como primer indicador de amenaza es discutible, ya que esta alteración en sí no necesariamente representa una amenaza intrínseca. En nuestro modelo lo comprendemos más como un primer indicador detectable de manera extensa y eficaz sobre múltiples lagunas, vinculado al derretimiento glaciar y al aumento de niveles de amenaza que conllevarían algunos cambios geomorfológicos en los glaciares, lagunas y respectivas laderas. Sin embargo, se debe considerar más parámetros en combinación, los cuales, además, requieren un mayor análisis y edición manual o un trabajo de campo.

Poblaciones expuestas a un GLOF en la Cordillera de Vilcabamba

La identificación de centros poblados expuestos a un GLOF es crucial para concentrar esfuerzos en lagunas priorizadas y tomar acciones para mitigar o evitar el impacto de este evento.

Se determinó que existen 15 centros poblados que se encuentran pendiente abajo de lagunas indicadores, de los cuales 10 tienen algún nivel de conexión con lagunas que representan una potencial amenaza baja-mediana y/o mediana-alta (Tabla 5 y Figura 6). Además, los resultados de modelamientos de flujos aluviónicos de $5.0\text{-}10.0 \times 10^6$

m³ realizados en las microcuencas del Salcantay, Sacsara y Aobamba (Buis, 2014), señalan a tres de estos centros poblados (Andihuela, Huadquiña y Sauce Pampa) como peligrosamente expuestos. El modelamiento indica que el nuevo poblado de Santa Teresa se encuentra comparativamente más seguro que Huadquiña y Sauce Pampa; sin embargo, la amenaza potencial persiste debido a posibles errores del DEM y otros errores adicionales.

Las lagunas B062, A162 y A038 (amenaza mediana-alta) pueden implicar una amenaza significativa para las poblaciones de Hornopampa, Yanama, Yanatile, Versalles, Huadquiña, Sauce Pampa, Santa Teresa y Ccantopata. Si bien de acuerdo al estudio de Buis (2014), la nueva población de Yanatile fue reconstruida fuera de la zona de mayor amenaza (Figura 6).

Centro poblado	Localización		Lagunas que representan amenaza
	Oeste	Sur	
Hornopampa	13°19'27"	72°49'36"	B010, B062, B067
Yanama	13°19'19"	72°50'48"	B010, B062, B067
Ccantopata	13°05'06"	72°52'02"	A038
Yanatile	13°10'29"	72°38'09"	A030, A041, A051, A124 y A162
Versalles	13°10'22"	72°37'55"	A030, A041, A051, A124 y A162
Andihuela	13°09'08"	72°37'52"	A030, A041, A051, A124 y A162
Huadquiña	13°07'59"	72°35'52"	A030, A041, A051, A124 y A162
Santa Teresa	13°07'48"	72°35'40"	A030, A041, A051, A124 y A162
Sauce Pampa	13°08'18"	72°35'44"	A030, A041, A051, A124 y A162
Sauceda	13°29'10"	72°30'18"	A078, B011, B013
Soray	13°22'43"	72°34'06"	A078, B011, B013
Ancascocha	13°29'57"	72°30'10"	A078, B011, B013
Ahuaccata	13°28'57"	72°30'03"	A078, B011, B013
Chongaña	13°17'55"	72°51'55"	B081
Mescay	13°13'56"	72°25'02"	A106

Tabla 5: Centros poblados expuestos a lagunas con potencial amenaza media-alta y muy alta. En la Figura 6 se visualiza en mayor detalle a estos centros poblados y a las lagunas que representan una amenaza.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El siguiente estudio revela el desarrollo acelerado de lagunas glaciares en un ambiente crecientemente propenso a la formación de nuevas lagunas. Este hallazgo es particularmente interesante dado que se presenta a pesar de contar con una ligera disminución en la tasa de retroceso de área glaciar y una aparente desaceleración en el aumento de la temperatura superficial durante las últimas dos décadas en esta región de alta montaña (Vuille et al., 2015). Además, el desarrollo de nuevas lagunas y crecimiento de lagunas existentes tiene serias implicancias para la futura gestión (integrada) de los recursos hídricos en la región que está caracterizada por fuertes cambios hidroclimáticos y socioeconómicos (Drenkhan, 2016). En este contexto, nuevos reservorios de agua constituyen una oportunidad de uso hídrico para, entre otros, el sector doméstico, agrícola e hidroeléctrico, pero al mismo tiempo un alto potencial de conflicto entre los múltiples usuarios de agua (Drenkhan et al., 2015).

Nuestros resultados sobre nuevas lagunas formadas indican un mayor desarrollo en el rango altitudinal de 4400 a 4800 msnm lo cual sugiere asumir que el derretimiento glaciar ha sido una de las principales fuentes de alimentación de estas lagunas al formarse próximas a la zona límite actual de los glaciares o en depresiones recientemente descubiertas de hielo. Una pregunta de investigación por trabajar en más detalle en próximos estudios sería corroborar la tasa de formación de nuevas lagunas glaciares y crecimiento de espejos de agua existentes mediante más estudios para identificar en mayor detalle la relación entre el cambio en factores climáticos, topografía, derretimiento glaciar y formación de lagunas en ésta y otras cordilleras de los Andes.

El modelo semiautomático presentado en combinación con técnicas de parametrización basada en valores empíricos, representa una manera eficaz y robusta para hallar datos de áreas aproximadas y una dimensión de volúmenes en regiones extensas e inaccesibles de forma sistemática, y de esta manera estimar la magnitud del

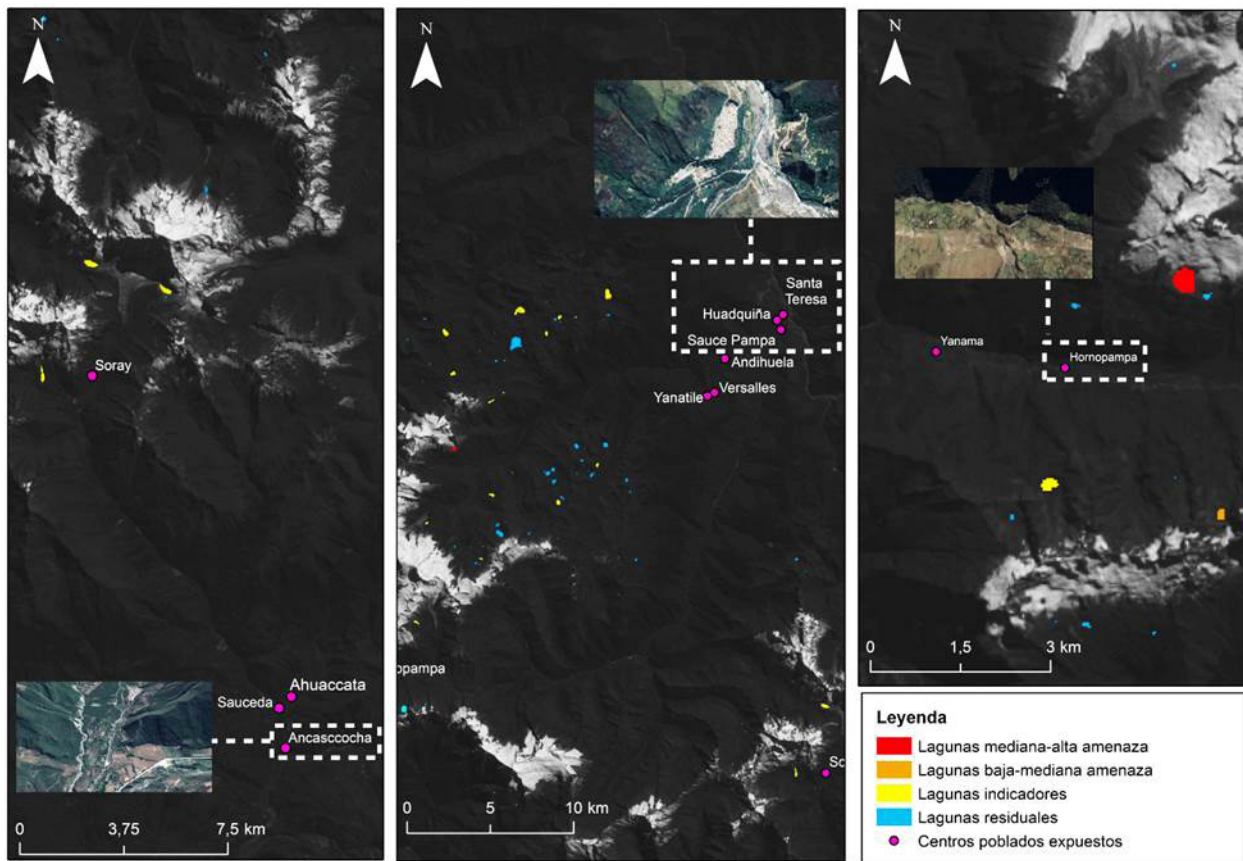


Figura 6. Visualización de centros poblados expuestos. La imagen base empleada corresponde a la banda 3 de Landsat 8 OLI del 29.05.2014.

problema. Hasta la actualidad no existen formas de mayor precisión para determinar el volumen lagunar sin aplicar métodos directos de batimetría que involucran mucho más esfuerzo y tiempo.

Limitantes en este estudio radican en el tratamiento digital de las imágenes satelitales, selección de umbrales de NDSI y NDWI, ediciones manuales y definición de parámetros de amenaza. Aunque en las imágenes de Landsat los glaciares y lagunas no representan objetos muy sensibles que presentan fuertes cambios de reflectancia según método de corrección, se podría considerar una corrección radiométrica a fin de homogeneizar mejor los valores de NDSI y NDWI. Las imágenes de Sentinel (10 m, 16 bit), ASTER (15 m, 12 bit) y SRTM (30 m, 16 bit, todavía con vacíos) libremente accesibles desde el 2015/2016, representan un nuevo hito para mejorar la calidad de futuros resultados de un estudio como éste. Adicionalmente, nuevos estudios podrían incorporar iteraciones basadas en trabajo de campo y protocolos (inter)nacionales para ajustar los umbrales de amenaza de las lagunas glaciares y proponer una metodología de definición de riesgo incorporando más variables de exposición y vulnerabilidad de la población local.

Hasta la actualidad faltan estudios sistemáticos con protocolos estandarizados para determinar la amenaza de lagunas glaciares y potencial de riesgo en la zona con los parámetros correspondientes. Además, para poder comprender en más detalle cambios en los factores climáticos a largo plazo y su posible impacto en la morfología (peri)glaciar, el desarrollo de las lagunas glaciares y cambios en las condiciones de amenaza, se debe contar con una mayor red de monitoreo meteorológica,

glaciar y geomorfológica. Actualmente, no existe una red de monitoreo glaciar y sísmico sistemático ni en la Cordillera de Vilcabamba, ni en otras cordilleras vecinas (Hoffmann y Weggenmann, 2013).

La UGRH ha iniciado mediciones sistemáticas de batimetría en lagunas de la Cordillera Blanca, Ancash, para hallar estadísticas de (cambios en) la profundidad y volumen de principales lagunas glaciares. Este monitoreo debe ser ampliado a las otras cordilleras. En este contexto se debe mencionar los bajos recursos que tradicionalmente el Gobierno ha asignado a los Gobiernos Regionales/Locales y la ANA/UGRH para poder presupuestar medidas concretas de Reducción del Riesgo de Desastres (RRD) y fomentar conciencia y oportunidades de adaptación a las nuevas condiciones adversas en la población local. La coyuntura actual positiva en el país y la región, mediante la creación del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) perteneciente al Ministerio del Ambiente (MINAM) así como una nueva Unidad de Glaciología en Cusco a través de la Plataforma de Glaciología en este año, podrían ayudar a promover el monitoreo sistemático de lagunas señaladas en este y otros estudios. Para ello será netamente importante articular y coordinar estrechamente entre las diferentes instituciones los múltiples estudios, campañas y toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

El estudio ha sido desarrollado en el marco de una tesis de licenciatura de Geografía (PUCP, Lima) y del Proyecto Glaciares+. Los autores agradecen la detenida revisión del manuscrito por Wilfried Haerberli y los valiosos comentarios

de Christian Huggel y Holger Frey (Universidad de Zúrich). Los autores también agradecen los comentarios de un revisor anónimo y datos proporcionados por Wilson Suarez (SENAMHI, Lima), Alejo Cochachin (UGRH, Huaraz) y Virginia Ruiz-Villanueva (Universidad de Ginebra).

REFERENCIAS

- ANA. (2012a). *Inventario de lagunas de las cordilleras Apolobamba / La Raya / Vilcabamba / Volcánica / Urubamba*.
- . (2012b). *Inventario nacional de glaciares de las cordilleras Apolobamba, La Raya, Vilcabamba, Volcánica y Urubamba*.
- . (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*.
- Bajracharya, S. y Mool, P. (2009). Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50 (53), 81–86. doi:10.3189/172756410790595895
- Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M. y Blagoveshchensky, V. (2012). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tian Shan. En Pradhan, B. y Buchroithner, M. (Eds.). *Terrigenous mass movements: detection, modelling, early warning and mitigation using geoinformation technology*, 369–98. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin. doi:10.1007/978-3-642-25495-6_12
- Booth, J. E. y Punt, L. J. (2012). Analysis of glacial lake outburst flood triggering mechanisms for the Imja Tsho glacial lake and potential effects on the downstream morphology of the stream channel. *Trail Six: An Undergraduate Journal of Geography*, 6, 81–90.
- Buis, D. (2014). *Trigger analysis and modelling of very large debris flows in Santa Teresa, Cusco, southern Peru*. Tesis de maestría. Department of Geography, University of Zurich, Zurich.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. Oxford, Oxford University Press.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W. y Tintaya, D. (1999). *Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machupicchu. Hojas 26-Q y 27-Q*. Boletín 127, Serie A: Carta Geológica Nacional. Lima, INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico).
- Cook, S. y Quincey, D. (2015). Estimating the volume of alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3, 559–575. doi:10.5194/esurf-3-559-2015
- Drenkhan, F. (2016). En la sombra del cambio climático: Hacia una gestión integrada y adaptativa de recursos hídricos en los Andes del Perú. *Espacio y Desarrollo*, 28, 25-51. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/15003>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J. y Oré, M. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715-733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Frey, H., Huggel, C., Bühler, Y., Buis, D., Burga, M., Choquevilca, W.,... Walser, M. (2016). A robust debris-flow and GLOF risk management strategy for a data-scarce catchment in Santa Teresa, Peru. *Landslides*, March 2015, 1–15. doi:10.1007/s10346-015-0669-z
- Frey, H., Huggel, C., Paul, F. y Haeberli, W. (2010). Automated detection of glacier lakes based on remote sensing in view of assessing associated hazard potentials. En Kaufmann, V. y Sulzer, W. (Eds.). *Proceedings of the 10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Kathmandu*. Grazer Schriften der Geografie un Raumforschung 45, 261-272.
- Giráldez, C., Cusipaucar, F., Farfán, N., Puma, R., Quispe, A., Barra, J.-C.,... Lozono, G. (2012). Proyecto “Glaciares”. Informe de la expedición a la quebrada Sacsara del 9 al 12 de noviembre 2012. Reporte interno del Proyecto.
- Haeberli W., Huggel, C., Paul, F. y Zemp, M. (2013). Glacial responses to climate change. En Shroder, J. (Ed.). *Treatise on Geomorphology*, 13, 152-175. San Diego, Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00350-X
- Haeberli, W. y Schweizer, J. (1988). Rhonegletscher 1850: Eismechanische Ueberlegungen zu einem historischen Gletscherstand. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich*, 94, 59–70.
- Haeberli, W., Schaub, Y. y Huggel, C. (2016a). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.geomorph.2016.02.009
- Haeberli, W., Cochachin, A., Fischer, U., Giráldez, C., Linsbauer, A. y Salazar, C. (2016b). On the morphological characteristics of overdeepenings in high-mountain glacier beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 1980-1990. doi:10.1002/esp.3966
- Hanshaw, M. N. y Bookhagen, B. (2014). Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012 : Status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *The Cryosphere*, 8(2), 359–76. doi:10.5194/tc-8-359-2014
- Harrison, S., Glasser, N., Winchester, V., Haresign, E., Warren, C. y Jansson, K. (2006). A glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *The Holocene*, 16(4), 611–20. doi:10.1191/0959683606hl957rr
- Hegglin, E. y Huggel, C. (2008). An integrated assessment of vulnerability to glacial hazards. *Mountain Research and Development*, 28(3), 299–309.

doi:10.1659/mrd.0976

- Hoffmann, D. y Weggenmann, D. (2013). Climate change induced glacier retreat and risk management: Glacial lake outburst floods (GLOFs) in the Apolobamba mountain range, Bolivia. *En Leal Filho, W. (Ed.). Climate Change and Disaster Risk Management*, 71-87. doi: 10.1007/978-3-642-31110-9_5
- Huggel, C., Kääb, A. y Haeberli, W. (2003). *Vulnerability study of the central hidroelectrica Machupicchu - glacial hazard assessment and modelling based on satellite imagery*. Final Report. Department of Geography, University of Zurich.
- Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W., Teysseir, P. y Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. doi:10.1139/t01-099
- INGEMMET. (1999). *Estudio glaciológico de la cuenca del río Aobamba*. Informe técnico. Lima, Dirección de Geotecnia, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Jain, S., Lohani, A., Singh, R., Chaudhary, A. y Thakural, L. (2012). Glacial lakes and glacial lake outburst flood in a Himalayan basin using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 62(3), 887–899. doi:10.1007/s11069-012-0120-x
- Kaser, G. y Osmaston, H. (Eds.). (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge, Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- MAXIMIZE Consult S.A. (2011). Diagnóstico de línea base Santa Teresa. Cusco. Proyecto PRAA.
- Mergili, M., Kopf, C., Müllebnner, B. y Schneider, J. F. (2012). Changes of the cryosphere and related geohazards in the high-mountain areas of Tajikistan and Austria: A comparison. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 94(1), 79–96. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00450.x
- NASA. (2016). Technical details [Landsat images]. http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=2290
- PNUD. (2013). *Informe sobre desarrollo humano Perú 2013. Cambio climático y territorio: Desafíos y respuestas para un futuro sostenible*. Lima, PNUD.
- Portocarrero, C. (2014). *The glacial lake handbook; Reducing risk from dangerous glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru*. Washington, D.C., USAID. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pbaaa087.pdf
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L.,... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. doi:10.5194/tc-7-81-2013
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P. y Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103–118. doi:10.5194/tc-7-103-2013
- Silverio, W. y Jaquet, J.-M. (2005). Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342–50. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012
- Suarez, W., Cerna, M., Ordóñez, J., Frey, H., Giráldez, C. y Huggel, C. (2013). Monitoring glacier variations in the Urubamba and Vilcabamba mountain ranges, Peru, using “Landsat 5” images. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-8182.
- USGS. (2013). NASA shuttle radar topography mission (SRTM) version 3.0 (SRTM Plus) product release. https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/nasa_shuttle_radar_topography_mission_srtm_version_30_srtm_plus_product_release
- Vuille, M., Kaser, G. y Juen, I. (2008a). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62 (1-2), 14–28. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.11.003
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008b). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Sven, W., Casimiro, L. y Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 120(9), 3745-3757. doi:10.1002/2015JD023126
- Wegner, S. (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.
- Worni, R., Huggel, C. y Stoffel, M. (2012). Glacial lakes in the Indian Himalayas - From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes. *Science of the Total Environment*, 468-469. Elsevier B.V.: S71–84. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.11.043.

Anexo 1. Caracterización de lagunas indicadores, con potencial amenaza baja-mediana y mediana-alta.

Código	Localización		Tipo de dique	Área promedio por año				Crecimiento promedio (1991-2014)		Distancia al glaciar 10 ³ m
	Oeste	Sur		1991	2001	2010	2014	Relativo	Absoluto	
				10 ³ m ²	10 ³ m ²	10 ³ m ²	10 ³ m ²	%	10 ³ m ²	
A002	13°07'12"	72°41'30"	Rocoso	138.6	140.4	145.8	156.6	13	18.0	9.8
A004	13°07'43"	72°44'26"	Rocoso	145.8	143.1	152.1	163.8	12	18.0	5.5
A005	13°07'57"	72°43'06"	Rocoso	30.6	31.5	36.0	36.0	18	5.4	6.8
A006	13°07'57"	72°42'33"	Rocoso	2.7	4.5	4.5	6.3	133	3.6	7.6
A008	13°08'31"	72°46'53"	Rocoso	82.8	85.5	87.3	90.0	9	7.2	3.4
A009	13°08'29"	72°43'31"	Rocoso	27.9	28.8	30.6	33.3	19	5.4	5.6
A017	13°09'04"	72°48'44"	Rocoso	2.7	3.6	4.5	5.4	100	2.7	4.0
A021	13°09'50"	72°46'40"	Rocoso	44.1	45.0	50.4	54.0	22	9.9	1.1
A030	13°10'43"	72°45'21"	Rocoso	22.5	23.4	22.5	27.9	24	5.4	0.7
A034	13°11'58"	72°56'06"	Rocoso	39.6	39.6	39.6	45.0	14	5.4	2.7
A038	13°12'28"	72°49'07"	Morrénico	139.5	145.8	166.5	168.3	21	28.8	1.2
A041	13°12'45"	72°41'47"	Rocoso	22.5	27.9	27.0	28.8	28	6.3	5.3
A051	13°13'47"	72°45'15"	Rocoso	34.2	35.1	36.9	40.5	18	6.3	2.7
A055	13°13'59"	72°43'04"	Rocoso	46.8	48.6	53.1	53.1	13	6.3	2.2
A060	13°14'42"	72°47'27"	Morrénico	9.0	12.6	13.5	16.2	80	7.2	3.1
A068	13°15'50"	72°45'40"	Morrénico	9.9	10.8	13.5	15.3	55	5.4	0.6
A077	13°19'49"	72°21'52"	Morrénico	30.6	30.6	27.9	39.6	29	9.0	1.5
A078	13°20'32"	72°34'09"	Morrénico	70.2	63.0	74.7	76.5	9	6.3	1.1
A082	13°09'54"	73°02'07"	Rocoso	37.8	42.3	42.3	44.1	17	6.3	1.8
A085	13°10'38"	73°02'40"	Rocoso	3.6	3.6	5.4	7.2	100	3.6	1.1
A106	13°17'36"	72°23'32"	Rocoso	0.0	0.0	18.9	25.2	33	6.3	0.0
A108	13°18'06"	72°24'01"	Rocoso	0.0	1.8	7.2	7.2	300	5.4	0.3
A110	13°18'02"	72°22'01"	Morrénico	34.2	42.3	45.1	45.9	34	11.7	0.5
A124	13°10'26"	72°44'57"	Rocoso	3.6	4.5	7.2	7.2	100	3.6	1.6
A145	13°09'42"	72°54'10"	Rocoso	3.6	7.2	7.2	7.2	100	3.6	5.7
A149	13°13'08"	72°53'52"	Rocoso	38.7	45.0	45.0	46.8	21	8.1	1.6
A158	13°09'17"	72°51'33"	Rocoso	49.5	49.5	54.0	54.9	11	5.4	3.7
A162	13°12'15"	72°46'33"	Rocoso	0.0	0.0	29.7	45.0	52	45.0	0.0
A166	13°15'21"	72°30'11"	Rocoso	18.0	19.8	20.7	27.0	50	9.0	0.9
B007	13°17'54"	72°47'48"	Mixto	19.8	19.8	29.7	29.7	50	9.9	2.2
B010	13°20'30"	72°49'44"	Rocoso	37.8	38.7	43.2	44.1	17	6.3	1.3

Código	Localización		Tipo de dique	Área promedio por año				Crecimiento promedio (1991-2014)		Distancia al glaciar 10 ³ m
	Oeste	Sur		1991 10 ³ m ²	2001 10 ³ m ²	2010 10 ³ m ²	2014 10 ³ m ²	Relativo %	Absoluto 10 ³ m ²	
B011	13°21'04"	72°32'35"	Morrénico	0.0	41.4	59.4	61.2	48	19.8	0.8
B013	13°22'43"	72°35'05"	Morrénico	29.7	30.6	42.3	44.1	48	14.4	1.1
B017	13°34'31"	72°53'16"	Morrénico	52.2	51.3	54.9	57.6	10	5.4	3.3
B026	13°21'06"	73°06'05"	Rocoso	16.2	18.0	19.8	21.6	33	5.4	4.9
B028	13°20'45"	73°02'19"	Rocoso	90.0	103.5	99.9	101.7	13	11.7	1.0
B029	13°20'49"	73°06'43"	Rocoso	3.6	5.4	5.4	7.2	100	3.6	5.8
B035	13°33'37"	72°55'10"	Mixto	0.0	0.0	0.0	6.3		6.3	0.5
B062	13°18'39"	72°48'31"	Rocoso	0.0	0.0	46.8	112.5	140	65.7	3.5
B067	13°20'46"	72°48'09"	Mixto	4.5	24.3	20.7	20.7	360	16.2	0.2
B081	13°16'54"	72°51'35"	Rocoso	0.0	0.0	14.4	22.5	56	8.1	0.2
C001	13°08'12"	73°05'46"	Mixto	238.5	223.2	250.2	252.9	6	14.4	7.2
C003	13°08'33"	73°04'32"	Rocoso	1.8	7.2	7.2	7.2	300	5.4	5.9
C004	13°09'04"	73°07'57"	Rocoso	4.5	3.6	6.3	9.0	100	4.5	7.5
C015	13°12'39"	73°08'38"	Rocoso	85.5	94.5	94.5	93.6	9	8.1	2.2
C016	13°13'18"	73°11'19"	Rocoso	45.0	48.6	50.4	50.4	12	5.4	2.2
C018	13°13'32"	73°08'28"	Rocoso	2.7	2.7	3.6	6.3	133	3.6	1.8
C020	13°13'36"	73°08'37"	Rocoso	94.5	100.8	102.6	107.1	13	12.6	2.1
C023	13°14'44"	73°12'25"	Rocoso	35.1	37.8	40.5	41.4	18	6.3	2.1
C024	13°16'16"	73°09'05"	Rocoso	33.3	34.2	36.9	38.7	16	5.4	4.0
C035	13°14'34"	73°06'17"	Mixto	6.3	11.7	11.7	11.7	86	5.4	0.8
C041	13°14'32"	73°11'19"	Rocoso	11.7	11.7	17.1	17.1	46	5.4	2.9

 Lagunas baja-mediana amenaza

 Lagunas mediana-alta amenaza

CONTEMPORARY LANDSCAPE CHANGES IN THE CORDILLERA BLANCA AND CORDILLERA HUAYHUASH OF PERU (1936-2012)

Cambios en el Paisaje Contemporáneo de la Cordillera Blanca y la Cordillera Huayhuash del Perú (1936-2012)

Sergiu George Jiduc¹

¹Centre for Environmental Policy, Imperial College London, UK

ABSTRACT

Landscape changes in the Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash of Peru between 1936 and 2012 were documented, focusing on glacier and vegetation cover, as well as changes in the cultural landscape. Repeat photography (an analytical tool capable of broadly and rapidly providing clarifications regarding landscape and land use changes within a given region) was the principal method used, along with oral testimonies and literature reviews. The base material used for the research consisted of historic photographs taken by the German and Austrian Alpine Club (*Alpenverein*) Expeditions to the Cordillera Blanca in 1936 and 1939, as well as photographs taken by F. D. Ayres in 1954 for the National Snow and Ice Data Center in Boulder, Colorado. Results suggest that since 1936 the Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash have experienced widespread glacier recession and the formation of new glacier lakes. In terms of the vegetative landscape, the native *Polylepis* forest cover appears to have remained stable, whereas the area covered by non-native *Eucalyptus* and *Pinus* species appears to have increased. At the same time, the cultural landscape clearly shows urban expansion.

Keywords: *Landscape change, mountain landscape, deglaciation, Huascarán National Park, Peru, natural resource management, photo monitoring*

RESUMEN

Se documentaron cambios en el paisaje en la Cordillera Blanca y la Cordillera Huayhuash del Perú entre 1936 y 2012, enfocándose en la cobertura de glaciares y de la vegetación, así como en los cambios en el paisaje cultural. La fotografía repetitiva (“repeat photography”, una herramienta analítica capaz de ofrecer ampliamente y rápidamente aclaraciones en relación a los cambios en el paisaje y en el uso de la tierra dentro de una región específica) fue el principal método usado, complementado con testimonios orales y una revisión de la literatura pertinente. Los insumos de base para la investigación consistían en fotografías históricas tomadas por las Expediciones de los Clubes Alpinos (*Alpenverein*) de Alemania y Austria a la Cordillera Blanca en 1936 y 1939, además de fotografías

tomadas por F. D. Ayres en 1954 para el National Snow and Ice Data Center en Boulder, Colorado. Los resultados sugieren que, desde 1936, la Cordillera Blanca y la Cordillera Huayhuash han experimentado una recesión glaciaria extensa y la formación de nuevas lagunas glaciares. En términos del paisaje vegetal, la cobertura de los bosques nativos de *Polylepis* parece haber mantenido estable, mientras que el área cubierta por las especies no nativas de *Eucalyptus* y *Pinus* parece haber aumentado. Al mismo tiempo, el paisaje cultural muestra claramente la expansión urbana.

Palabras clave: *Cambios del paisaje, paisaje de montañas, desglaciación, Parque Nacional Huascarán, Perú, manejo de recursos naturales, monitoreo fotográfico*

INTRODUCCIÓN

The Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash are the most prominent mountain ranges in all of Peru. The Cordillera Blanca is a straight mountain chain, 180 km long, striking NNW to SSE, and running parallel to the coast from 8°5' S to 10° S latitude. It also forms the main watershed of Peru's coastal region. From a geologic perspective, the Cordillera Blanca is made of plutonic rocks that have penetrated the upper layers of the Earth's crust. These rocks consist mainly of light colored granodiorite (intrusive igneous rock containing more plagioclase than orthoclase), and can be found in glaciated areas forming the base of the peaks. Stratified rocks such as black slate (foliated, homogenous, metamorphic rock) surround the granodiorite. These are folded and strongly compressed towards the crests (Kinzl and Schneider, 1950).

The Cordillera Blanca offers some of the best mountaineering in South America. Its advantageous position in relation to traffic routes and exceptional high summits make it an accessible and popular high altitude destination. In terms of climate, the Cordillera Blanca has a tropical climate with two main seasons (i.e., dry and wet) alternating according to the distribution of rainfall. The rainy season begins in November and ends in April, reaching its greatest intensity between January and March. The dry season occupies the remaining months and is considered to be the best season to visit the two cordilleras.

The Cordillera Huayhuash is a compact subregion of the Cordillera Occidental, 30 km long and striking NNW to SSE, running fairly parallel to the coast from 10°8' S to 10°24' S latitude. It contains sharp summits, six of which exceed 6000 m. The geology of the Huayhuash is comprised of limestone, interbedded with sandstone and shale. Volcanic activity is also present in the form of active geothermal areas, hydrothermal alteration (e.g., sulphate minerals and iron oxide) and hot springs. In some limestone beds, marine fossils, such as ammonites and bivalves, can be found. The Cordillera Huayhuash is home to some of the most spectacular and difficult alpine climbing in all of the Andes and is considered by many to be one of the best trekking regions in the world (Frimer, 2005).

The Huascarán National Park is situated in Ancash Department in the north-central part of Peru and includes most of the Cordillera Blanca. The national park was established in 1975 and was declared a UNESCO Biosphere Reserve in 1977. The park contains 60 peaks with altitudes above 5700 m, the highest being Huascarán South at 6768 m. Forty-four glacial valleys transect the range from both west and east. The terrain below 4800 m is characterized by high altitude grassland (puna) with remnant quenal (*Polylepis* sp.) forests located within the upper inner valley slopes. The *Polylepis* forest cover hosts a highly diverse flora and fauna and provides habitat for several endemic species of Andean birds. Unfortunately, humans have drastically reduced the area covered by *Polylepis* forest

during the past century, and currently only 3 per cent of the original forest remains intact.

West of the national park lies the agricultural and earthquake-prone valley of the Santa River, a densely populated region containing cities such as Huaraz (130,000 inhabitants), Caraz (11,000 inhabitants), and hundreds of rural settlements. These cities are relatively prosperous, although most rural inhabitants still rely on subsistence agriculture as their means of living. Incomes are mainly based on agriculture, livestock, and a growing tourism sector, especially on the western side of the park.

Important environmental issues exist in the area. They include overgrazing of alpine and subalpine pastures, concentrated tourism, uncertain land titles and park boundaries, government policies supportive of resource extraction within the national park, and subsequent external pressures such as new roads, mining, dams, and tourist infrastructure. However, during 1995 and 1996, The Mountain Institute (TMI), along with governmental, non-governmental, private sector and local communities produced the Huascarán National Park Ecological Management Plan, the country's first participatory plan for protected areas (Byers, 2000). TMI has continued to work in the region, along with a range of other non-governmental organizations, in the fields of education, cultural conservation, alpine restoration, climate change, and water supply.

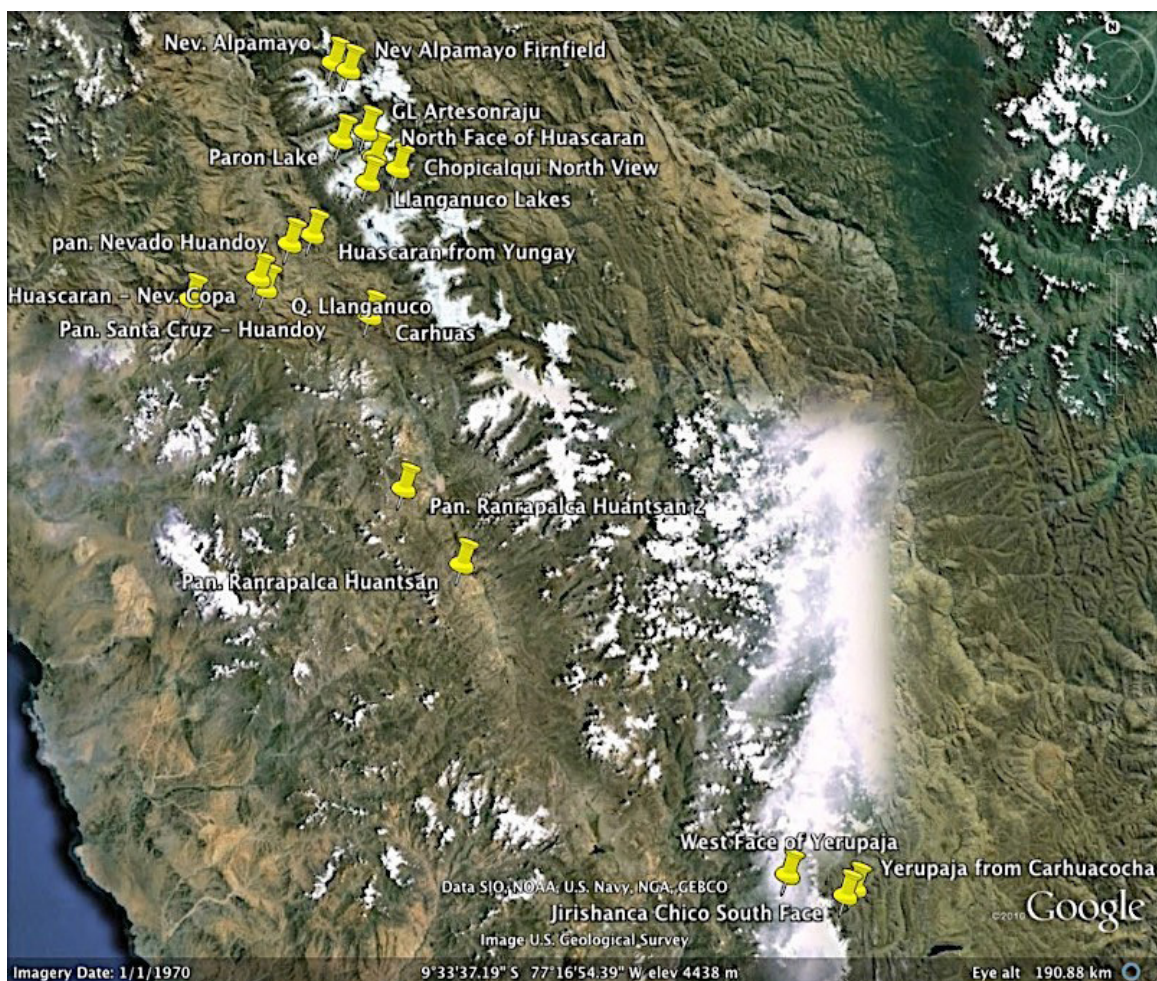


Figure 1. Google Earth map showing the location of the two cordilleras in Peru and our photo locations after cross-referencing with the locations from the Alpenverein maps. ©Google Earth.

METHODOLOGY

Between the 1930s and the 1950s, the Deutscher und Österreichischer Alpenverein (DuÖAV) and Deutscher Alpenverein (DAV) expeditions produced the world-renowned *Alpenverein* maps, using terrestrial photogrammetry from mid- to high-altitude photopoints. Moreover, thousands of glass plate negatives and Leica photographs were also produced, which are scattered across Europe in various collections. These historic landscape photographs provide a unique opportunity to qualitatively document contemporary landscape changes (Byers, 2000).

Repeat photography is an analytical tool capable of broadly and rapidly providing preliminary clarifications related to landscape and land use changes within a given region and was the main research tool used in this study. Literature reviews and oral testimony from local people and scientists were also used in our efforts to interpret and describe apparent changes between the older photographs and our newer repeat photographs. The equipment used included a Canon EOS MK III DSLR camera with three different lens systems: (1) EFS18-55mm f/2.8, Canon 24-105mm f/4 IS, and Canon EF 70-300mm f/4-5.6 IS; (2) a Canon EOS 550D DSLR camera with two lens systems; and (3) a Canon EFS 18-55mm, f/3.5-5.6 IS, Tamron AF 28-300mm f/1:3.5-6.3 IF, and a Panasonic DMC LX2 28mm digital compact camera. For the video documentation of our expedition, we used a HD Sony Handycam and a Go Pro Hero 2 video camera.

Ideally, historic photographs should be replicated using the precise equipment used by the original photographer. Season, time, date and weather conditions should also be replicated as closely as possible (Byers, 2000). This was quite challenging due to budgetary and time constraints, the remoteness and high altitude of the photopoint locations, and the difficult working conditions. Nevertheless, the overall objective to accurately replicate a range of historic



Figure 3. Nevado Ranrapalca 6126 m. ©DuÖAV, 1936.

photographs was met (Figure 1).

The Alpenverein maps used for our research included the 1932 DuÖAV (Deutschen und Österreichischen Alpenvereins, München) “Cordillera Blanca y el Callejón de Huailas (Peru)” (Figure 2). This map is commonly referred to as the “Parte Norte” or “North Sheet” of the Cordillera Blanca. The 1939 DAV (Deutschen Alpenverein, Innsbruck) “Cordillera Blanca (Perú) Parte Sur” map was also used. Other maps included the 1939 DAV Cordillera Huayhuash Expedition “Cordillera de Huayhuash (Peru)”, and the DAV “Alpenvereinskarte Cordillera Huayhuash”, published in 2008.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Nevado Ranrapalca (6126 m)

Our expedition managed to reproduce 21 pairs of photographs, 14 of which are shown and described below.

Date: 08.08.2012

Aspect: 272°

Time: 12:41

Map Station: S24

Altitude: 5028 m

Original: DuÖAV, 1936

The thinning and retreat of several hundred meters of ice is clearly apparent when comparing the two photographs. The formation of a new glacial lake in the cirque depression at the bottom on the SE side of Ranrapalca (right hand side of Figure 4) is due to the meltwater runoff sourcing the ice and snow cover above. The erosive effect of glaciers can also be observed.



Figure 4. Nevado Ranrapalca 6126 m. ©S. Jiduc, 2012.

2. Glacial Lake Palcacocha, Quebrada Cojup

Date: 08.08.2012

Aspect: 01°

Time: 13:04

Map Station: S24

Altitude: 4991 m

Original: DAV, 1939

Palcacocha is a tropical glacial lake subject to glacial lake outburst floods (GLOFs). On December 13, 1941,



Figure 5. Glacier Lake Palcacocha, Q. Cojup. ©DAV, 1939.



Figure 6. Glacier Lake Palcacocha, Q. Cojup. ©S. Jiduc, 2012.

an ice avalanche from a hanging glacier on Pucaranra – Palcacocha fell into the impounded Palcacocha Lake shown in Figure 5, causing the breaching of the terminal moraine that contained the lake. A massive wave swept down the entire Cojup Valley, and also subsumed the water of another lake, Laguna Jircacocha, situated 2-3 miles downstream. The combined water of the two lakes descended onto Huaraz, carrying debris, boulders, ice, and liquid mud. Approximately 1,800 people died and the northern third of the city was destroyed (Wegner, 2014: 41-42). The approximate arrival time of the flood from its initiation to Huaraz was estimated at 22 minutes, with the peak in downstream discharge produced at about 33 minutes after the breach (Rivas, 2012). The flood drained a large volume of water from Palcacocha Lake as shown in Figure 6. Image comparison also shows widespread glacier recession, especially in the center and left hand side of the photographs. Ice thinning is also present on Palcaraju (6274 m). New geomorphic features such as gullies, sumps, and torrents have also formed. Climate change is accelerating the retreat of tropical glaciers in Peru with hydrological consequences such as increases in glacial lake volume (Rivas, 2012). Although the 1941 GLOF event drained a substantial amount of water, the volume of Palcacocha Lake

has increased from 1941 to 2010 by more than 7 million cubic meters. Recent studies have suggested that a flood today could kill between 2,800 and 6,125 people (Somos et al., 2013; Cuéllar, 2016). Although an attempt to lower the level of Palcacocha with siphons (Figure 8) did not produce the desired results, the Ministry of Environment funded a project in 2013 to design an early warning system (EWS), following the glacier research and community consultation activities of the USAID-funded High Mountains Adaptation Partnership (HiMAP), implemented by TMI/Peru (Cuéllar, 2016).

3. Glacial Lake Palcacocha, Quebrada Cojup

Date: 08.08.2012
 Aspect: 038°
 Time: 09:18
 Map Station: S39
 Altitude: 4525 m
 Original: DAV, 1939



Figure 7. Glacier Lake Palcacocha, Q. Cojup. ©DAV, 1939.



Figure 8. Glacier Lake Palcacocha, Q. Cojup. ©S. Jiduc, 2012.



Figure 9. Glacier Lake Palcacocho, Q. Cojup.
©S. Jiduc, 2012.



Figure 10. Breakthrough Morainal Dam, Q. Cojup.
©F. D. Ayres, 1954.

This set of photographs shows the evolution of Palcacocho Lake and recession of the glaciers that surround the lake. Comparison between the old and recent photographs shows that widespread glacier retreat and thinning has occurred in the interim, especially in the center of Figure 8, and the accumulation of moraine debris, probably due to erosion and rock avalanches. The size of the lake has also increased substantially since 1941 due to the retreat of the glacier.

4. Breach of the moraine dam, Quebrada Cojup

Date: 07.08.2012

Aspect: 020°

Time: 17:25

Map Station: S1

Altitude: 4368 m

Original: F. D. Ayres, 1954

Figures 10 and 11 show the moraine breach that resulted from the 1941 ice avalanche and flood. The terminal moraine wall was estimated to be approximately 45 m high. Comparison between the two images shows an apparent increase in the width of the breach region, most likely due to erosion and use of boulders for the construction of the dam and drainage system. The debris flow that accompanied the flood can be clearly seen in Figures 10 and 11. Puna (alpine) grassland appears to have covered some parts of the terrain. Significant shrinkage and thinning of the Pucaranra and Palcaraju glaciers is also apparent.



Figure 11. Breakthrough Morainal Dam, Q. Cojup.
©S. Rechitan, 2012.

5. View through the south breach of the moraine wall, Laguna Palcacocho, Quebrada Cojup

Date: 08.08.2012

Aspect: 188°

Time: 08:49

Map Station: S2

Altitude: 4513 m

Original: F. D. Ayres, 1954

Figures 12 and 13 show the view between the walls of the south breach of the moraine due to the 1941 flood. In 1954, F. D. Ayres estimated that the height of the walls was around 150 feet (30 m). Today, the height of the walls is slightly lower. This change is most likely due to erosional processes as well as the removal of moraine material for the construction of the Palcacocho dam, shown in Figure 9. The width of the cut has also increased by a few feet (<1 m). The moraine material is composed of debris, rock, and ice deposits. The drainage pipes are visible in the bottom part of Figure 13.



Figure 12. View of the south cut of the moraine wall.
©F. D. Ayres, 1954.

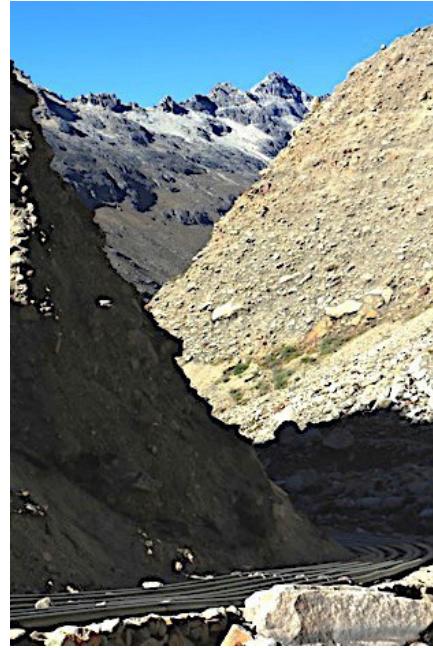


Figure 13. View of the south cut of the moraine wall.
©S. Jiduc, 2012.

6. Glacial Lake Artesonraju, Quebrada Parón

Date: 15.08.2012
Aspect: 350°
Time: 14:30
Map Station: S37
Altitude: 4297 m
Original: DAV, 1939

Figures 14 and 15 clearly show the significant loss of ice cover that has occurred over the past 73 years. The rock face in the center of the images is approximately 300 m high, and the entire hanging glacier has disappeared. The lake also appears to have increased substantially in size and volume. The large seracs present in Figure 14 on the southwest face of Artesonraju have shrunk considerably. Based upon interviews with local people, river runoff is said to have increased since 1939. Because of the importance of the hydrological contributions of Parón Valley, this area has received some of the most detailed studies of any region within the Cordillera Blanca.



Figure 14. Glacier Lake Artesoncocha, Quebrada Parón.
©DAV, 1939.



Figure 15. Glacier Lake Artesoncocha, Quebrada Parón.
©S.Jiduc, 2012.

7. New glacial lake in the Parón Valley

Date: 12.08.2012

Time: 16:45

Altitude: 4850 m

Aspect: 22°

Figure 16 shows the Parón Glacier located between Artesonraju and Piramide. The glacier has retreated some 300 m, forming a new glacial lake. A monitoring station, which measures glacier melt rate, snowfall, solar radiation intensity, wind speed, humidity and precipitation, has also been installed on the glacier. These measurements are important to assess the condition of the glacier and lakes, and thus prevent a sudden outburst flood. Such an event would be disastrous for the communities located downstream, such as Caraz.



Figure 16. New glacial lake at the head of Parón Valley. ©S. Rechitan, 2012.

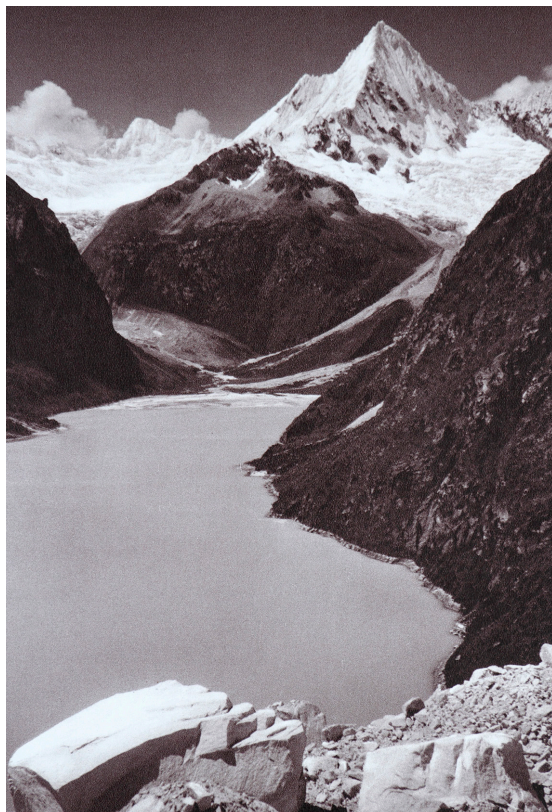


Figure 17. Laguna Parón as seen from moraine. ©DAV, 1939.

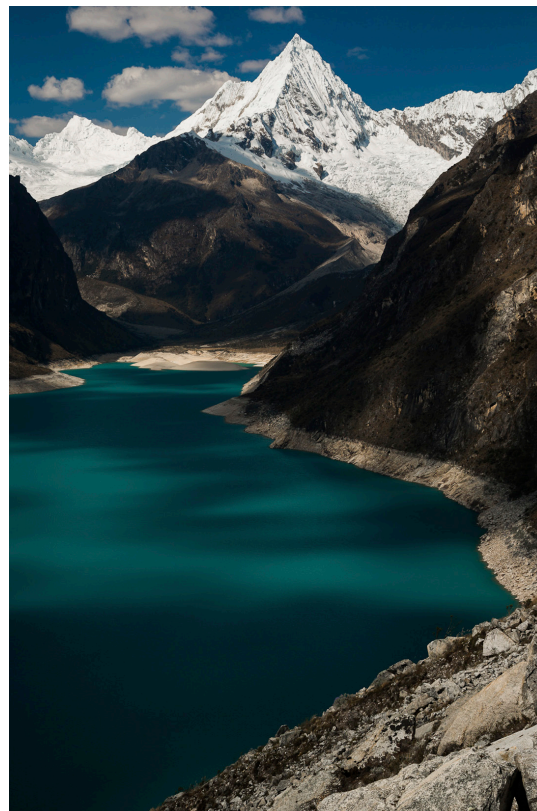


Figure 18. Laguna Parón y Nevado Pirámide. ©S. Rechitan, 2012.

8. Laguna Parón

Date: 11.08.2012

Aspect: 057°

Time: 15:03

Map Station: S38

Altitude: 4346 m

Original: DAV, 1939

Laguna Parón is the largest lake in the Cordillera Blanca and was formed as a natural moraine reservoir. The lake has been used for the Cañón del Pato hydroelectric plant. An

interview with an employee informed us that the catchment area of the lake is 44.3 km², and that the lake is 3.7 km long (E-W), 700 m wide (N-S), and had an original depth of about 75 m. Today the level of the lake is about 15 meters lower to prevent the collapse of the moraine. Comparison between the photographs shows a decrease in water level and volume of the lake since 1939. This level drop is the result of anthropic control in order to prevent a collapse of the moraine. Now, the water level is controlled by a system of tunnels, valves and an underwater gate to keep the water level at 4155 m, aiming to achieve the double objective of flood prevention and provision of downstream irrigation services. The high concentrations of dissolved lime give the water of Parón a turquoise color.

9. Yerupajá (6617 m) as seen from Laguna Carhuacocha

Date: 21.08.2012

Aspect: 230°

Time: 08:20

Map Station: S43

Altitude: 4138 m

Original: DuÖAV, 1936

Glacier recession also occurs in the Cordillera Huayhuash. Figures 19 and 20 show the Yerupajá East Glacier, which has lost an estimated 200 m of ice since 1939. Most of the hanging ice has been lost through the collapse of seracs and avalanches. Recession is also present on the left hand side of Figure 20, on the col between Yerupajá and Siulá Grande. We observed an increase in the number, size and frequency of crevasses on all the glaciers explored. Many climbing routes established in the 1970s are now impracticable and unsafe due to the massive crevasses and bergschrunds that have developed across the entire mountain faces, some of

them being 40 m wide or more.

The team encountered difficulties crossing these new crevasses and bergschrunds while attempting to climb Yerupajá Grande's West Face. The route descriptions from the 1970s, such as those presented in Frimer (2005), acknowledged the existence of these large crevasses and bergschrunds, but they were considered safe to cross at that point in time. However, today these crevasses are often far too wide to cross.

Low latitude glaciers are sensitive indicators in the climatic system. The atmosphere in the low latitudes is thermally homogenous in space and time and, thus, seasonality is caused by the annual cycle of atmospheric moisture content. Therefore, low latitude glaciers, such as the ones in Cordillera Blanca and Huayhuash, show seasonal fluctuations or changes in the seasonality of moisture related to climate variables, besides the thermally induced variations. Drier atmospheric conditions may have affected the Cordillera Huayhuash in recent years, accelerating the melting of glaciers.

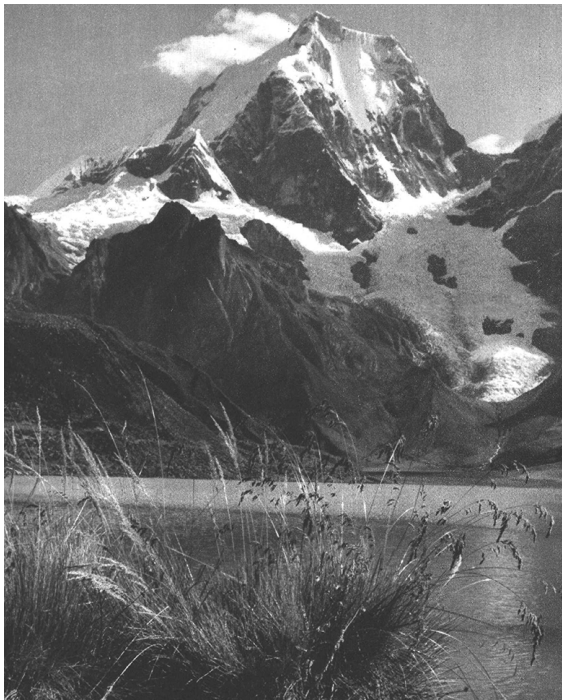


Figure 19. Yerupajá seen from Laguna Carhuacocha.
©DuÖAV, 1936.



Figure 20. Yerupajá seen from Laguna Carhuacocha.
©S. Jiduc, 2012.

10. Huascarán seen from Yungay cemetery

Date: 06.08.2012

Aspect: 058°

Time: 15:04

Map Station: S21

Altitude: 2657 m

Original: DAV, 1939

In 1970, Yungay city and Ranrahirca village were completely destroyed and buried under a thick layer of liquefied mud, ice, and large boulders from Huascarán, triggered by a 7.7 magnitude earthquake (Figure 23). The

earthquake caused the collapse of a large hanging glacier located on the west face of Huascarán North, turning into a deadly debris flow that jumped over a mountain and completely buried Yungay, with only the cemetery surviving the "aluvión". A new city has been built further north of the old one, although people still live and work in the area affected by the debris flow (Figure 22). As the Santa Valley continues to be affected by earthquakes, the potential for new debris flows is high. Other changes include the apparent increase in eucalyptus cover since the debris flow, and the thinning and retreat of glaciers on Huascarán. The limit marked by the difference in rock color (the lighter brown being the consequence of glacier erosion such as abrasion and plucking) represents the past snow line. This line has progressed a few hundred meters further up the mountain.



Figure 21. Huascarán seen from Yungay cemetery. ©DAV, 1939.



Figure 22. Huascarán seen from Yungay cemetery. ©S. Rechitan, 2012.



Figure 23. Left: Image showing the source and path of the debris flow. Black arrows indicate the location of old Yungay and Ranrahirca settlements. Right: Example of the amount of destruction caused by the deadly flow. Source: <http://luirig.altervista.org>.

11. North view of Nevado Huascarán

Date: 09.08.2012
 Aspect: 198°
 Time: 16:20
 Map Station: S19
 Altitude: 4500 m
 Original: DAV, 1939

Figures 24 and 25 show another example of the massive glacier recession that has occurred in the Cordillera Blanca

since the 1930s. For example, Huascarán North, the highest peak in Peru at 6768 m, has lost several hundred meters of snow and ice cover in the past 73 years. The north summit of Huascarán seems to be the most affected by glacier recession. Substantial ice thinning is also obvious from the comparison of the two photographs. Moreover, the moraine/glacier catchment seems to have experienced substantial geomorphic change, such as moraine wall collapse, increase in surface area, rock and debris avalanches, ice retreat and infill of melt water.



Figure 24. North side of Huascarán seen from Llanganuco Valley. ©DAV, 1939.



Figure 25. North side of Huascarán seen from Llanganuco Valley. ©S. Rechitan, 2012.

12. Nevado Chopicalqui

Date: 09.08.2012
 Aspect: 165°
 Time: 16:56
 Map Station: S20
 Altitude: 4726 m
 Original DAV, 1939

The north view of Nevado Chopicalqui (6354 m) shown in the image pair below was taken from the highest pass

of Quebrada Llanganuco. Large-scale glacier recession appears to have occurred since 1939, with obvious ice thinning and recession in some areas, such as in the collapsed ice flutings of the summit crest. The glacier on the bottom lefthand side of Figure 27 has shrunk by several hundred meters, and the hanging seracs present in the 1939 photograph (Figure 26) have partially if not all but disappeared. The “Swiss roll” ice features present on the north ridge in the center of Figure 26 appear to have also shrunk considerably in size.



Figure 26. North view of Nevado Chopicalqui. ©DAV, 1939

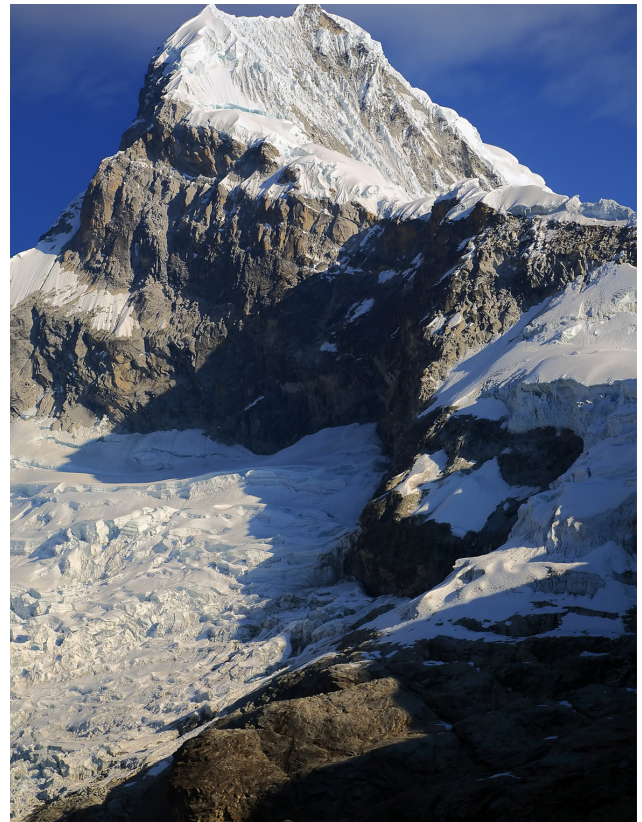


Figure 27. North view of Nevado Chopicalqui. ©S. Rechitan, 2012

13. Quebrada Llanganuco

Date: 09.08.2012
 Aspect: 234°
 Altitude: 4493 m
 Time: 15:31
 Map Station: S41
 Original: DAV, 1939

Quebrada Llanganuco offers excellent views of Huascarán, Huandoy, Yanapaccha and Pisco, the latter

being one of the most popular climbs in the Cordillera Blanca, as well as the beautiful lakes Chinancocha and Orconcocha (Figures 28 and 29). Llanganuco Valley is a highly popular tourist destination, partly as a consequence of being included in the great Santa Cruz trek and also because it provides the main access route to Pisco, Chopicalqui and Yanapaccha. Comparison between the two photographs shows an apparent stability in the area covered by the native ‘quenual’ (*Polylepis*) forest species, and the building of the road connecting the Callejón de Huaylas with Yanama and other cities situated on the eastern side.



Figure 28. Quebrada Llanganuco. ©DAV, 1939.

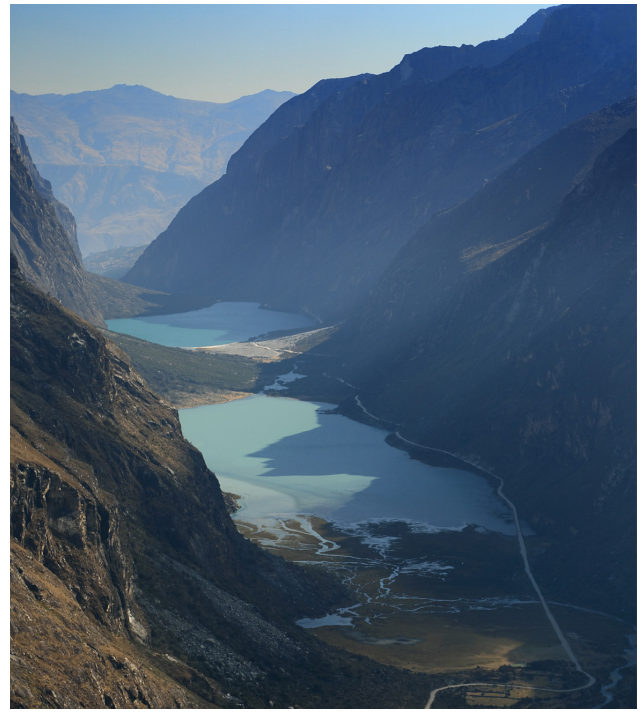


Figure 29. Quebrada Llanganuco. ©S. Rechitan, 2012.



Figure 30. Carhuaz seen from the Cordillera Negra. ©DAV, 1939.



Figure 31. Carhuaz seen from the Cordillera Negra. ©S. Jiduc, 2012

14. Carhuaz from Cordillera Negra

Date: 06.08.2012

Aspect: 072°

Time: 12:02

Map Station: S41

Altitude: 2829 m

Original: DAV, 1939

Carhuaz village was greatly damaged by the 1970 earthquake. A new city has been built on top of the old one, which has been populated with people from all around the country. According to interviews with local inhabitants, the population of the city has increased significantly in recent years. The street configuration of the city is, however, similar to the old one, although

the density of buildings is much greater. An apparent increase in the area covered by non-native *Eucalyptus* species has also occurred, and there seems to have been a decrease in cultivated area. Glacier recession is also apparent as a comparison between the background glaciers of Nevado Hualcán and Nevado Copa suggest.

15. Panorama of Huandoy, Huascarán and Copa

Date: 06.08.2012

Time: 17:00-18:00

Altitudes: 3810 m and 3850 m, respectively.

Map Stations: S9 and S10

Original: DAV, 1939

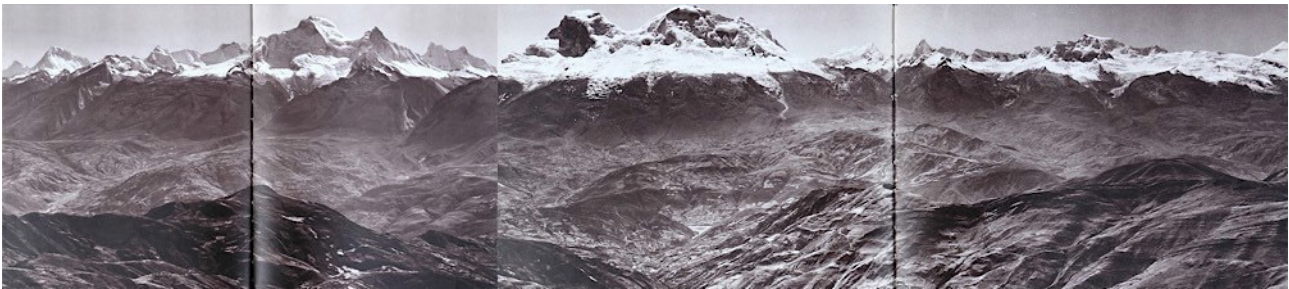


Figure 32. Composite panorama of Nevados Huandoy, Huascarán and Copa seen from the Cordillera Negra. ©DAV, 1939.



Figure 33. Composite panorama of Nevados Huandoy, Huascarán and Copa as seen from the Cordillera Negra. ©S. Jiduc, 2012

The panorama above provides an overview of the total scale of glacier recession that has occurred on the west side of Cordillera Blanca in the past 73 years. The new location of Yungay city is visible on the left side of Figure 33. There is an obvious increase in cultivated land and contained fields, as well as in the density and size of settlements. New roads have been built, including one traversing the entire cordillera through Quebrada Llanganuco, reaching an altitude of 4760 m. An apparent increase in the non-native eucalyptus forest cover is also shown.

DISCUSSION

The preceding study of landscape changes in the Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash of Peru was performed on the basis of three major parameters: glacial cover, vegetation cover and human influence on

land. The results of our study have shown that a relatively widespread and significant glacial recession has occurred in the region since the 1930s, with some glaciers losing between one-third and one-quarter of their size and mass. This recession has been accompanied by an increase in rock and ice avalanches, which in turn have increased the risk and likelihood of catastrophic glacial lake outburst floods. In response, Peruvian authorities since the 1950s have lowered some 35 glacial lakes in the region, using methods from simple ditches to state of the art methods such as drilling through a thousand meters of solid rock and installing valves that allow for the control of the lake's level. Nevertheless, many of these controlled lakes are now growing in size and volume because of warming trends, once again threatening downstream populations and infrastructure.

The melting of glaciers in the Cordilleras Blanca and Huayhuash is also affecting the vulnerability of Andean communities and their access to fresh water. As glaciers melt, there is a transitory increase in runoff due to mass reduction. Nevertheless, water stored as ice in glaciers is limited, and the apparent increase in runoff is only temporary. In a few decades, after the glaciers have lost substantial mass, a decrease in runoff will follow. This trend will be even more pronounced during the low flow season when the relative contribution of melt water is at its maximum (Baraer et al., 2012). In the next few decades, serious water shortage issues could affect many mountain communities living around the two cordilleras. Other issues confronting both cordilleras include the continued impacts of mining in the form of water pollution, unsustainable adventure tourism, including the growing impacts of improper disposal of solid and human waste, and extreme poverty.

CONCLUSION

The results of our repeat photographic expedition suggested that widespread glacier recession has occurred in the cordilleras Blanca and Huayhuash since the 1930s. Hydrological changes that have accompanied this loss of glacier mass include the formation of new glacial lakes and an apparent increase in runoff; changes in the flow characteristics of glacier fed rivers; changes in flood severity and frequency; and the presence of glacial lake outburst flood events. Urban expansion, population growth, and an increased human influence on water-glacier systems through the construction of dams and drainage systems have also occurred. An apparent stability in the area covered by native *Polylepis* species was detected, accompanied by an increase in the area covered by non-native *Eucalyptus* and *Pinus* species. Cultivated land has increased in area throughout much of the region, with several exceptions, such as around the settlement of Carhuaz. Of continued concern to both cordilleras will be the environmental degradation and pollution caused by contamination of soil and water resources due to mining activities, unsustainable tourism, improper waste disposal and extreme poverty.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank my university staff, Dr. Kate Heal, Dr. Wyn Williams and Dr. Anthony Newton, who supported the project and myself from the beginning, providing recommendations and constructive feedback as well as insightful advice. I also thank Christian Silva Lindo, whose knowledge, expertise, patience and hospitality made our expedition logistically possible. I thank, too, the Alpenverein librarians in Innsbruck and Munich and at the National Snow and Ice Data Center for providing valuable historic photographs. I particularly would like to thank the National Geographic Society for supporting the project and providing us the opportunity to stretch our limits and seek further into the field of research and exploration. Special thanks also goes to Mr. Horia Pasculescu, Mr. Razvan Muntianu, Mr. Vlad Lascu, Mr. Glad Varga, Mr. Alin Buda and the rest of my sponsors in Romania, as without their

support, the project would have been delayed considerably. Last but not least, I should thank Sorin Rechitan who provided photographic equipment and knowledge, thereby substantially increasing the quality of our material, and my climbing partner, Aurel Salasan, whose patience, dedication and climbing experience made the ascents possible.

REFERENCES

- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., Portocarrero, C., Gómez, J. and Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134-150.
- Byers, A. C. (2000). Contemporary landscape change in the Huascarán National Park and buffer zone, Cordillera Blanca, Peru. *Mountain Research and Development*, 20(1), 52-63.
- Cuéllar, A. D. (2016). *Climate change adaptation to increasing risk of glacial lake outburst floods: Decision making methodology for risk management applied to Imja Lake in Nepal and Lake Palcacocha in Peru*. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Frimer, J. (2005). *Climbs and treks in the Cordillera Huayhuash of Peru*. Squamish, British Columbia, Canada, Elaho Publishing Corporation.
- Kinzl, H. and Schneider, E. (1950). *Cordillera Blanca (Perú)*. Innsbruck, Austria, Universitäts-Verlag Wagner.
- Ricker, J. F. (1977). *Yurac Janka. A guide to the Peruvian Andes, Part I: Cordilleras Blanca and Rosko*. Banff, Canada, Alpine Club of Canada.
- Rivas, D. (2012). Term report. Glacier lake outburst flood (GLOF). Palcacocha Lake, Peru. Environmental and Water Resource Engineering Program. University of Texas at Austin.
- Somos-Valenzuela, M. A. (2014) *Vulnerability and decision risk analysis in glacier lake outburst floods (GLOF). Case Studies: Quillcay sub basin in the Cordillera Blanca in Peru and Dudh Koshi sub basin in the Everest region in Nepal*. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin.
- Wegner, S. (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.

DESCUBRIMIENTO DEL LAGO SUBGLACIAL CECS EN ANTÁRTICA¹ OCCIDENTAL

Discovering Subglacial Lake CECs in Western Antarctica

José Uribe², Rodrigo Zamora², Jonathan Oberreuter² y Andrés Rivera^{2,3}

²Centro de Estudios Científicos, CECs, Arturo Prat 514, Valdivia, Chile

³Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Portugal 84, Santiago, Chile

RESUMEN

Se reporta el descubrimiento del Lago Subglacial CECs (en honor al nombre de la institución, Centro de Estudios Científicos), ubicado en la parte central del casquete de hielo de la Antártica Occidental (WAIS, por sus siglas en inglés), en la divisoria entre el Glaciar Minnesota y la Corriente de Hielo Institute. Este lago, que fue descubierto mediante una travesía terrestre en enero de 2014 usando radio eco sondaje, se encuentra a una profundidad de 2653 m bajo la superficie del hielo. Los análisis preliminares muestran que se trata de un cuerpo de agua dulce que no ha mostrado cambios volumétricos, según lo observado con datos satelitales existentes hasta la fecha, por lo cual se cree que es un lago estable. Se presentan en este trabajo los datos más relevantes de este lago, así como los obtenidos en una segunda travesía llevada a cabo en diciembre de 2014.

Palabras clave: *Antártica, lago subglacial, espesor de hielo*

ABSTRACT

This article reports the discovery of the subglacial Lake CECs (named in honor of the Centro de Estudios Científicos), located in the central part of the West Antarctic Ice Sheet (WAIS), on the ice divide between the Minnesota Glacier and the Institute Ice Stream. This lake, which was discovered by means of an oversnow traverse in January 2014 using radio-echo sounding, is found at a depth of 2653 meters below the surface of the ice. Preliminary analyses show that it is a body of fresh water that has not shown volumetric changes to date, according to observations with existing satellite data, for which reason it is believed to be a stable lake. This article presents the most relevant data on this lake, as well as data obtained in a second traverse carried out in December 2014.

Keywords: *Antarctica, subglacial lake, ice thickness*

INTRODUCCIÓN

El continente antártico es reconocido por su clima frío extremo, siendo considerado un lugar inhóspito para la vida. Sin embargo, al contrario de lo que hace poco tiempo se creía, en este lugar puede encontrarse agua en estado líquido, bajo el hielo continental que cubre casi todo el continente. Se ha podido determinar que una vasta red de canales y ríos, junto con lagos subglaciales, subyacen bajo las grandes masas de hielo antártico, constituyendo una compleja red hidrológica basal (Siegert et al., 2007).

Los lagos subglaciales son reconocidos como un componente importante de esta red hidrológica, donde la circulación de agua basal juega un rol importante en la dinámica de las corrientes de hielo (Wright et al., 2008). De esta forma, es más común encontrar agua líquida basal, en vez que el hielo continental esté firmemente congelado en su base. Esto influye en la estimación del deslizamiento basal a la hora de realizar modelamiento de flujo de hielo continental o de corrientes de hielo. Esto es importante en el estudio del hielo continental de Antártica Occidental (WAIS) (Figura 1), que es el lugar que ha experimentado los mayores cambios recientes. WAIS ha sido considerado potencialmente inestable debido a que su base está por debajo del nivel del mar, su desintegración total podría contribuir a un aumento del nivel del mar de hasta 4.3 m (Fretwell et al., 2013).

Por otro lado, el análisis de sedimentos contenidos en el fondo de estos lagos podría contener evidencia acerca del clima de Antártica hace millones de años, quizás antes que el continente fuera cubierto por hielo.

Hasta el momento se ha identificado 379 lagos subglaciales potenciales (Wright y Siegert, 2012), de los cuales cerca de 150 carecen de confirmación por mediciones in situ. Gran parte de los lagos subglaciales están concentrados en Antártica Oriental, siendo pocos los identificados en Antártica Occidental. El lago subglacial más grande identificado es el Lago Vostok, en Antártica Oriental, con un área superficial de 14,000 km².

El descubrimiento de estas redes hidrológicas también ha abierto un nuevo campo de la ciencia en un corto periodo de tiempo. Hasta el momento, muy poco se conoce acerca de los procesos físico-químicos y biológicos dentro de estos ambientes acuáticos subglaciales. Algunos de estos

¹ Nota de la Redacción: La forma estándar en Chile utiliza la “c”, en vez de la “d”.

ambientes podrían estar aislados del exterior por millones de años y podrían contener formas de vida hasta ahora desconocidas, en condiciones de oscuridad absoluta y presiones elevadas. Estas condiciones podrían ser análogas a las que se dan fuera de nuestro planeta, como en las zonas congeladas de Marte o en la luna Europa de Júpiter (National Research Council, 2007).

Si bien ya se ha podido acceder mediante perforación al Lago Subglacial Whillans (Tulaczyk et al., 2014), este lago no ha estado aislado completamente. Aún no se ha logrado acceder a lagos subglaciales aislados de la red hidrológica subglacial.

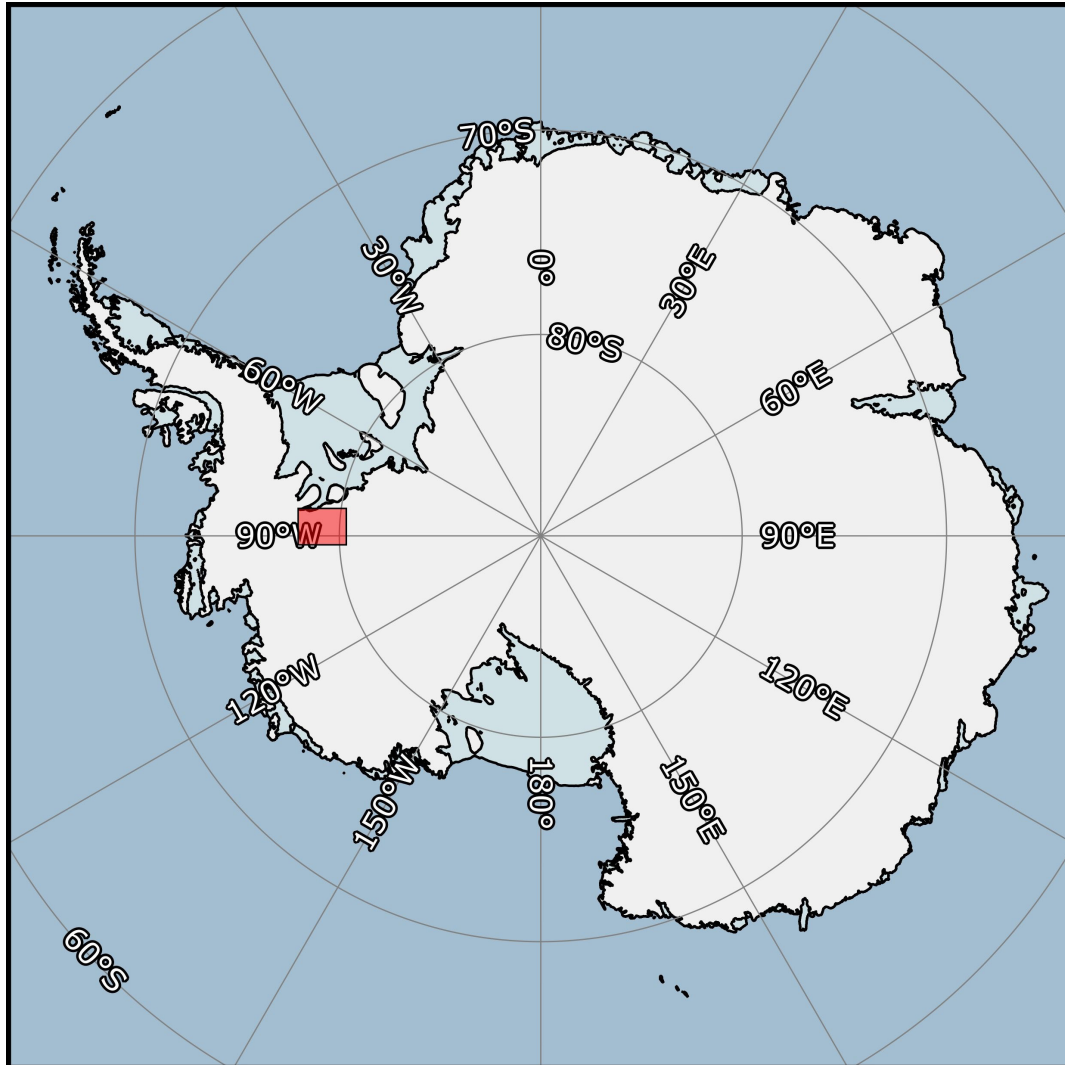


Figura 1. Mapa de ubicación general del Lago Subglacial CECs en Antártica Occidental. Área de interés en rectángulo rojo.

CARACTERÍSTICAS DE UN LAGO SUBGLACIAL

Los lagos subglaciales son formaciones de agua que están bajo el hielo continental. Se forman por agua derretida proveniente de la base del hielo, provocada por el constante calor geotermal proveniente de la corteza terrestre (Wright y Siegert, 2012). Otros factores contribuyen en la generación de agua en estado líquido en la base, como el desplazamiento hacia debajo del punto de fusión del agua debido a la alta presión provocada por el peso de toda la columna de hielo. Asimismo, la capa gruesa de hielo actúa como un aislador de calor entre la superficie y el fondo (National Research Council, 2007). Esto último se ve de manifiesto en que muchos lagos subglaciales se encuentran bajo un espesor de hielo entre 2 a 3 km.

Una de las características notables de un lago subglacial es su apariencia en una imagen de radio eco sondaje (radar), una de las técnicas geofísicas usadas en el estudio de glaciares (Oberreuter et al., 2014). En la Figura 2 puede observarse una imagen de radar, donde un lago aparece como un reflector plano, especular y de muy alta intensidad. Esta alta intensidad es debida a que el contraste dieléctrico entre el hielo y el agua es mucho mayor que entre el hielo y roca (Siegert et al., 1996). Se debe tener en cuenta que lo que aparece en la imagen sólo corresponde a la superficie del lago, ya que con esta técnica de detección no se puede registrar el fondo del lago.

Sin embargo, algunos lagos subglaciales no son fácilmente detectados mediante radar. Algunos, que presentan propiedades de llenado y vaciamiento regulares

(lagos activos), pueden ser identificados mediante sensores desde el espacio. Esto es posible debido a que estos eventos de llenado y vaciamiento provocan cambios en la elevación superficial, que pueden ser detectados mediante satélites (Fricker et al., 2007). Es posible usar los datos históricos de elevación superficial entregados por el satélite ICESat, el cual usa altimetría láser para realizar sus mediciones. Este satélite operó desde el año 2003 hasta el 2010.

DESCUBRIMIENTO DEL LAGO SUBGLACIAL CECS

El Centro de Estudios Científicos (CECs) en enero de 2014 realizó una travesía terrestre en el plateau de Antártica Occidental (Figura 1), desde el Glaciar Unión

cerca de los montes Ellsworth, donde existe una zona de hielo azul sobre la que aterrizan aviones con ruedas (Rivera et al., 2014), hasta la divisoria continental entre el Mar de Amundsen y el de Weddell (Figura 3). Dicha travesía fue llevada a cabo para la obtención de datos de topografía superficial, topografía subglacial, balance de masa y velocidades superficiales. Todos estos datos fueron tomados para estudios de estabilidad de la zona.

Durante esta travesía fue descubierto un lago subglacial, que posteriormente fue nombrado Lago CECs. La detección fue realizada mediante radio eco sondaje, empleando un radar desarrollado en el CECs (Uribe et al., 2014). El lago está ubicado al sur-oeste de los montes Ellsworth, justo en la divisoria entre el Glacier Minnesota (MIN) y la Corriente de Hielo Institute (IIS), como puede verse en la Figura 3.

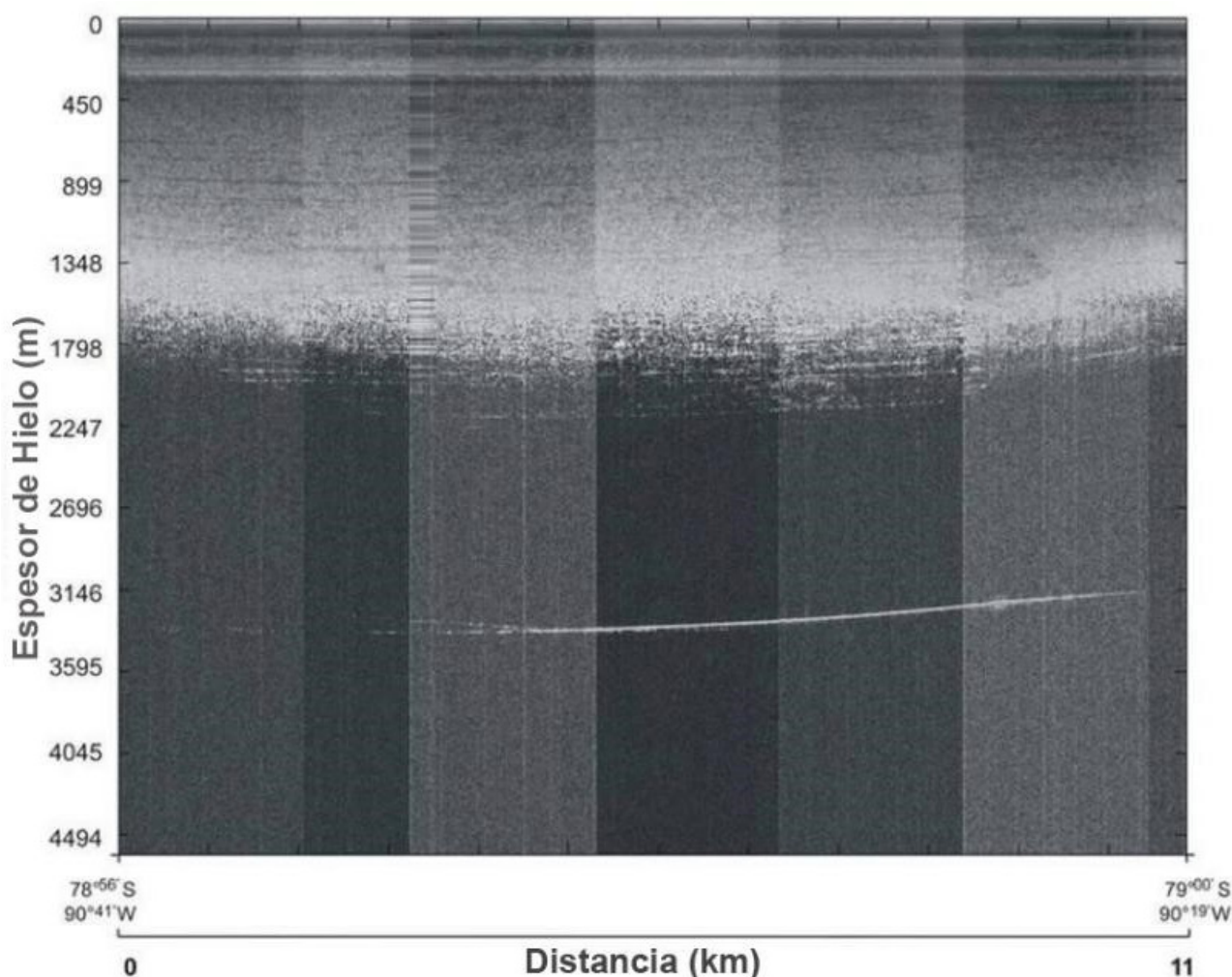


Figura 2. Imagen de radar del Lago Subglacial Ellsworth, Antártica Occidental. Entre 0 y 2250 m de espesor aproximadamente, se observa la señal de retorno de radar producida por la estructura interna del hielo, mientras que la línea plana inferior (a ~3200 m de profundidad) corresponde a la superficie del lago subglacial. Fuente: Vaughan et al., 2007.

Durante el mes de diciembre de 2014 se realizó una segunda travesía, con el objetivo de medir con mayor resolución el lago CECs. Esto, con el propósito de obtener una mejor estimación de su área y para identificar las

posibles rutas de llenado y/o vaciamiento de sus aguas. Durante esta travesía se realizaron además mediciones de la Corriente de Hielo Rutford, lo que se puede ver en la Figura 4 donde están las rutas de ambas travesías.

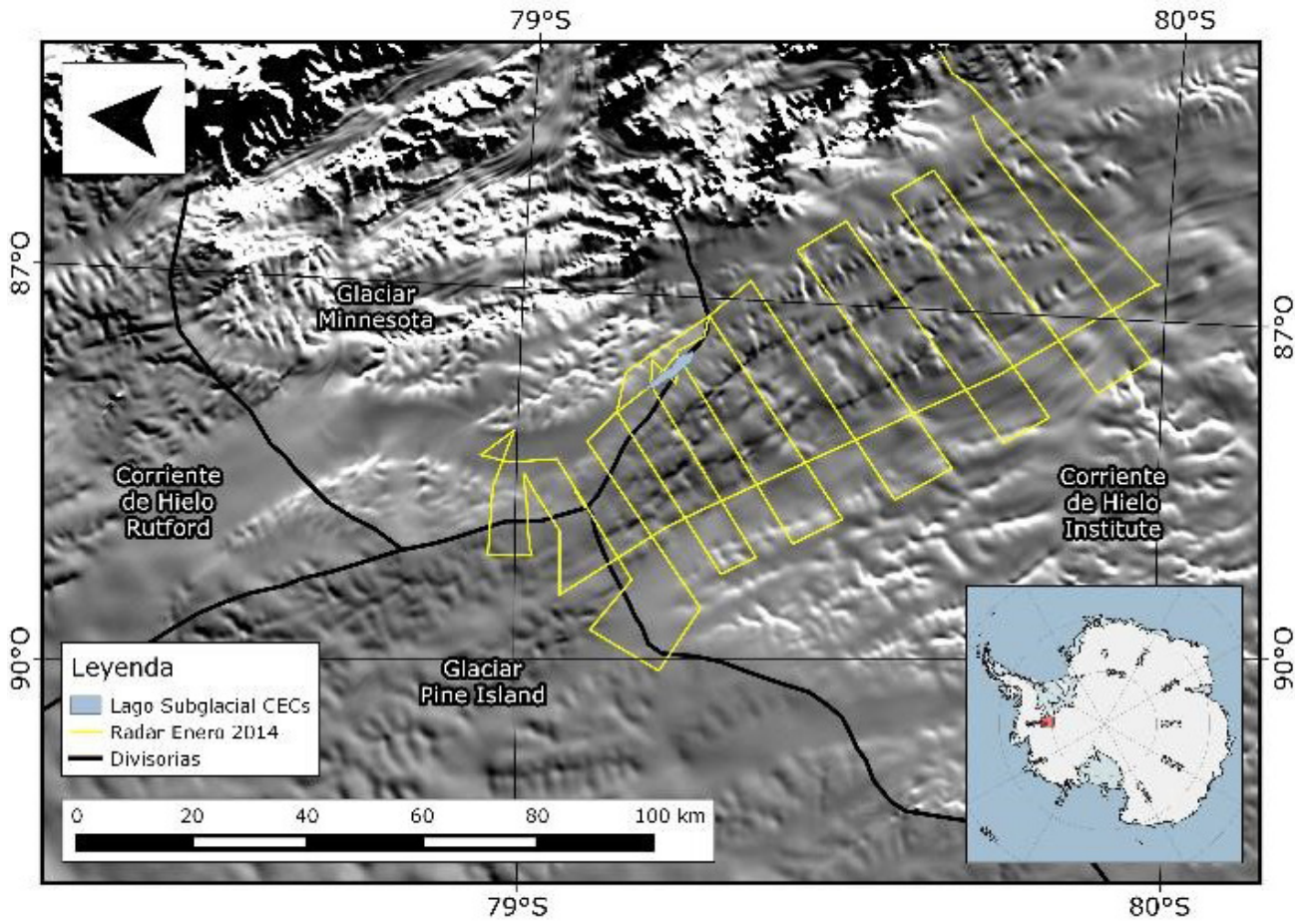


Figura 3. Ubicación del Lago CECs. Se observa la ruta de la travesía de enero de 2014. Imagen de fondo mosaico MODIS (Scambos et al., 2007).

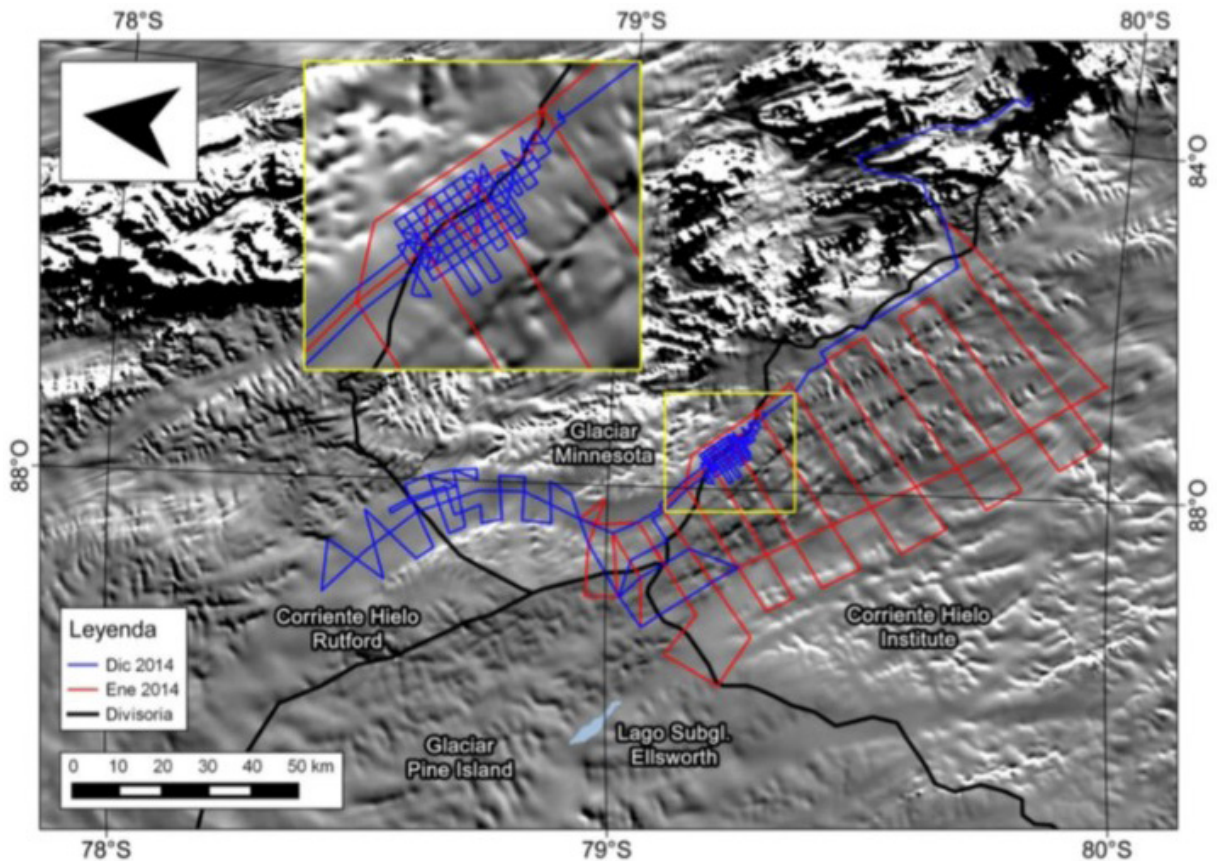


Figura 4. Rutas de las travesías CECs en enero (línea roja) y diciembre (línea azul) de 2014. Imagen de fondo mosaico MODIS (Scambos et al., 2007).

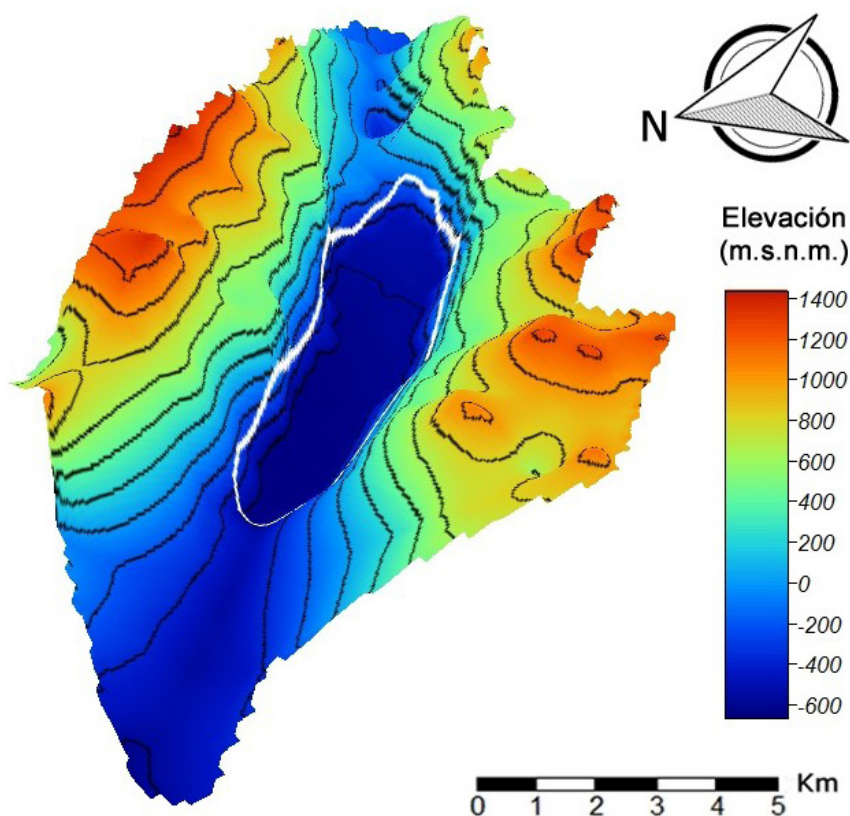


Figura 5. Elevación subglacial del Lago CECS y su entorno, determinado con datos de radar obtenidos en las travesías de enero y diciembre de 2014.

CARACTERÍSTICAS DE UN LAGO SUBGLACIAL

Con los datos obtenidos de ambas travesías, se ha determinado que el Lago CECS es un cuerpo de agua dulce, ubicado a 626 m bajo el nivel elipsoidal, bajo una capa de hielo de 2653 m de espesor promedio. La topografía superficial del hielo que se encuentra sobre el lago tiene una elevación promedio de 2029 m elipsoidales (Rivera et al., 2015).

Para la delimitación del lago se usaron datos de radar obtenidos en ambas travesías, lo que permitió definir un perímetro de 22.8 km y una superficie mínima de 15.6 km² aproximadamente. En la Figura 5 se muestra una representación de la topografía subglacial del lago.

Por otro lado se han realizado análisis para determinar la estabilidad del lago. En este caso se ha tratado de detectar movimientos verticales usando los datos disponibles de ICESat, obtenidos en dos pasadas repetidas varias veces entre octubre de 2003 y marzo de 2009. Con ellas se obtuvieron diferencias de menos de 0.5 m en el área donde se encuentra el Lago CECS. Este valor es menos de 1/3 de las diferencias de movimiento vertical asociados a lagos activos. Esto es ya un indicador de estabilidad mecánica, pues el error estimado de ICESat es del orden de unos pocos centímetros por año (Rivera et al., 2015).

En la Figura 6 se muestra un perfil de radar obtenido durante la primera travesía en enero de 2014. Se observa el lago como un reflector de mayor intensidad y plano, en comparación con el fondo rocoso.

En la Figura 7 se muestra un perfil de radar obtenido en el lago CECS. Nuevamente puede apreciarse el reflector de alta intensidad y plano que corresponde a la superficie del lago subglacial. A la derecha de esta figura están representadas la elevación superficial, la elevación subglacial, la cabeza hidrológica, la potencia reflejada del fondo y la desviación estándar del BRP, esta última asociada a la especularidad del reflector de fondo. Un valor de cabeza hidrológica prácticamente constante es un indicador de la presencia de un lago subglacial, ya que corresponde a la profundidad a la que el hielo sobre el lago es soportado completamente por la presión del fluido en el lago (Vaughan et al., 2007). Esto puede observarse en la gráfica de H en la figura. Por otro lado, un valor alto de BRP, 10 dB por encima de la reflexión en roca, así como una especularidad por debajo del 50% en un tramo de 300 m continuos (Carter et al., 2007) son indicadores de la presencia de un lago subglacial. Todos estos criterios son cumplidos por el Lago Subglacial CECS.

Con respecto a las propiedades del agua del lago, se considera que es un cuerpo de agua dulce. Es posible graficar la elevación superficial vs el espesor de hielo en la zona del lago (Figura 8). Siguiendo a Kapitsa et al. (1996), y teniendo en cuenta que la densidad del hielo (ρ_i) es 915 kg m⁻³, y que la presión a la cual está sometida el agua es de 24 MPa (columna de hielo de 2653 m), se obtiene que la densidad para agua dulce teórica (ρ_{fw}) debería ser 1011.7 kg m⁻³ y para agua salada (ρ_{sw}) debería ser 1039.8 kg m⁻³. Ambos casos están graficados como rectas en la Figura 8, siendo el caso del agua dulce la que más se acerca a los datos obtenidos.

ESTUDIOS FUTUROS

Hasta el momento se ha podido llevar a cabo una delimitación del lago, teniendo una mejor estimación de su ubicación y extensión geográfica, así como la profundidad de la interfaz hielo-lago. Sin embargo, no se conoce la batimetría, ya que la técnica de radio eco sondaje no permite detectar más allá de la interfaz hielo-lago.

La determinación de la batimetría nos permitiría realizar análisis más avanzados del lago, como por ejemplo balance de masa interno (derretimiento y recongelamiento en la interfaz hielo-lago), así como una determinación

más precisa de la distribución de temperaturas del agua subglacial.

Para poder llevar a cabo esto, es necesario emplear otra técnica geofísica, como es el caso de mediciones sísmicas. Aparte de la obtención de la batimetría, posiblemente podríamos estimar la presencia de sedimentos en el fondo del lago. El conocimiento del espesor del lago y la localización de sedimentos nos permitirían guiarnos en la selección de la mejor ubicación para realizar una futura perforación, si se diera la oportunidad de realizarla, de tal forma de extraer muestras de agua y sedimentos.

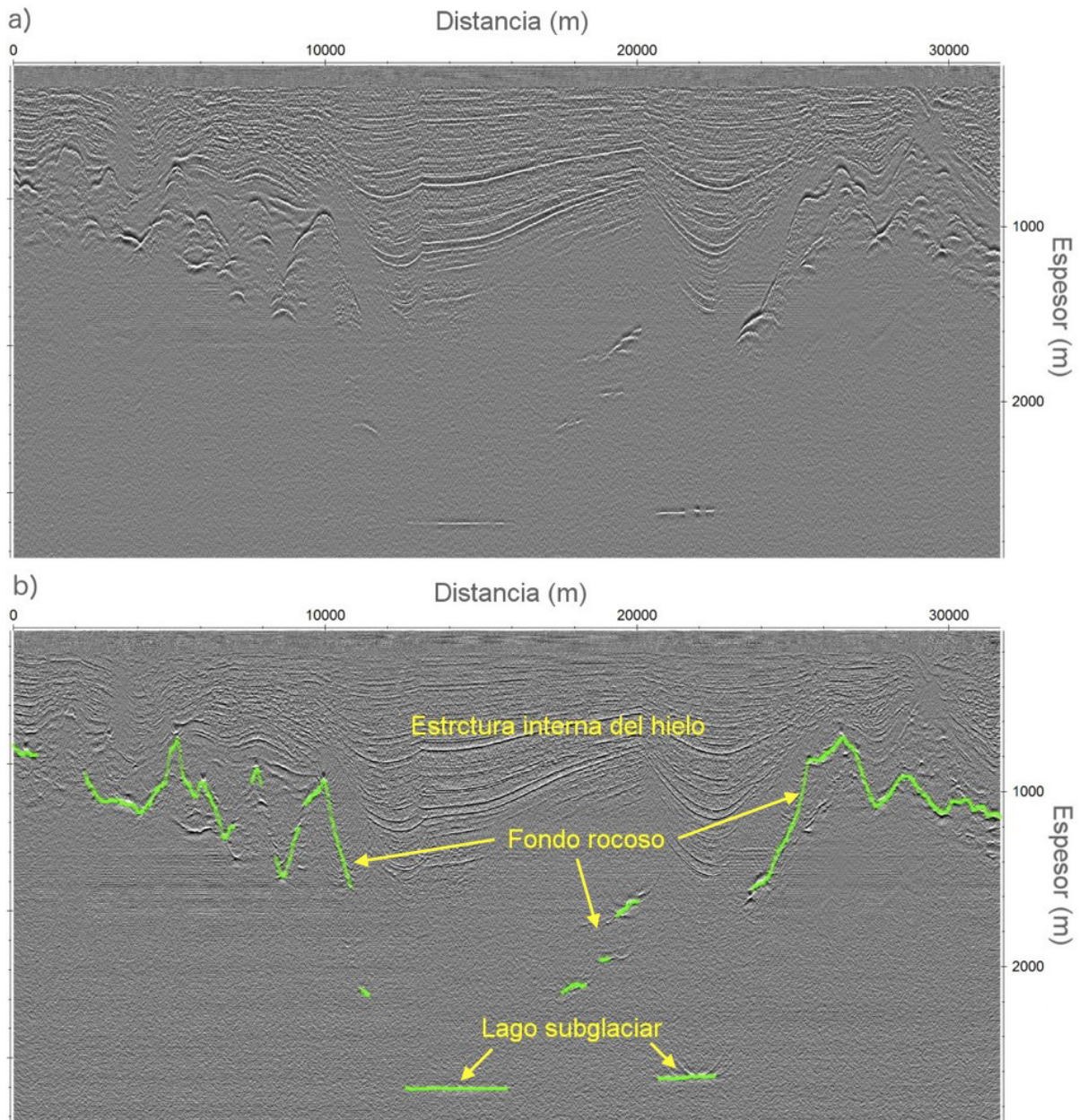


Figura 6. Perfil de radar sobre el área del Lago CECs (reflector plano a aproximadamente 2650 m de profundidad). a) Radargrama sin migración obtenido en enero de 2014, b) interpretación de los reflectores obtenidos, radargrama migrado.

CONCLUSIONES

Los lagos subglaciales son parte importante de la red hidrológica existente en la base del casquete antártico, la que tiene un rol destacado en la dinámica del hielo. Los lagos subglaciales pueden poseer formas de vida extremas y aisladas de la atmósfera por miles de años, por lo que su

estudio se ha desarrollado y ha captado en forma creciente el interés de la comunidad científica internacional.

Aquí se reporta el descubrimiento del Lago Subglacial CECs ubicado en Antártica Occidental, en la divisoria entre el Glaciar Minnesota y la Corriente de Hielo Institute. Este corresponde a un cuerpo de agua dulce que se encuentra

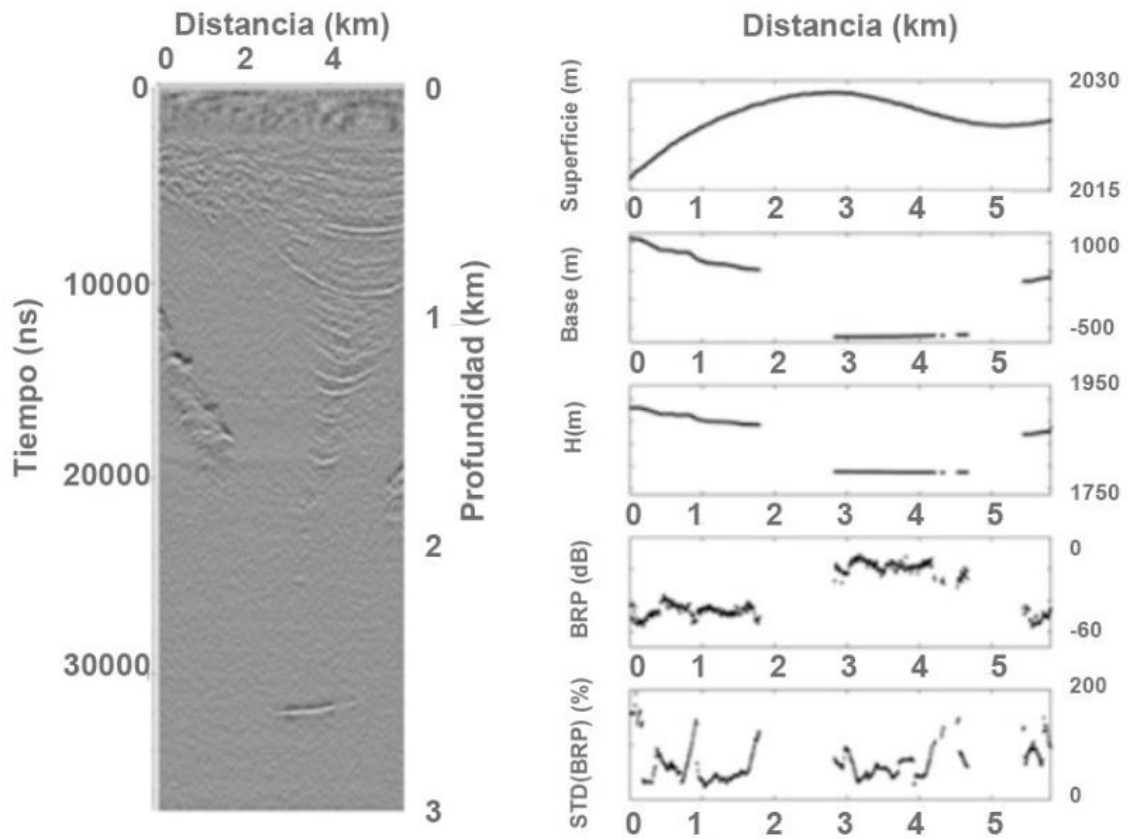


Figura 7. A la izquierda, perfil de radar y a la derecha, elevación superficial (Superficie), elevación subglacial (Base), cabeza hidrológica (H), potencia reflejada de fondo (BRP) y especularidad (STD(BRP)). Fuente: Rivera et al., 2015.

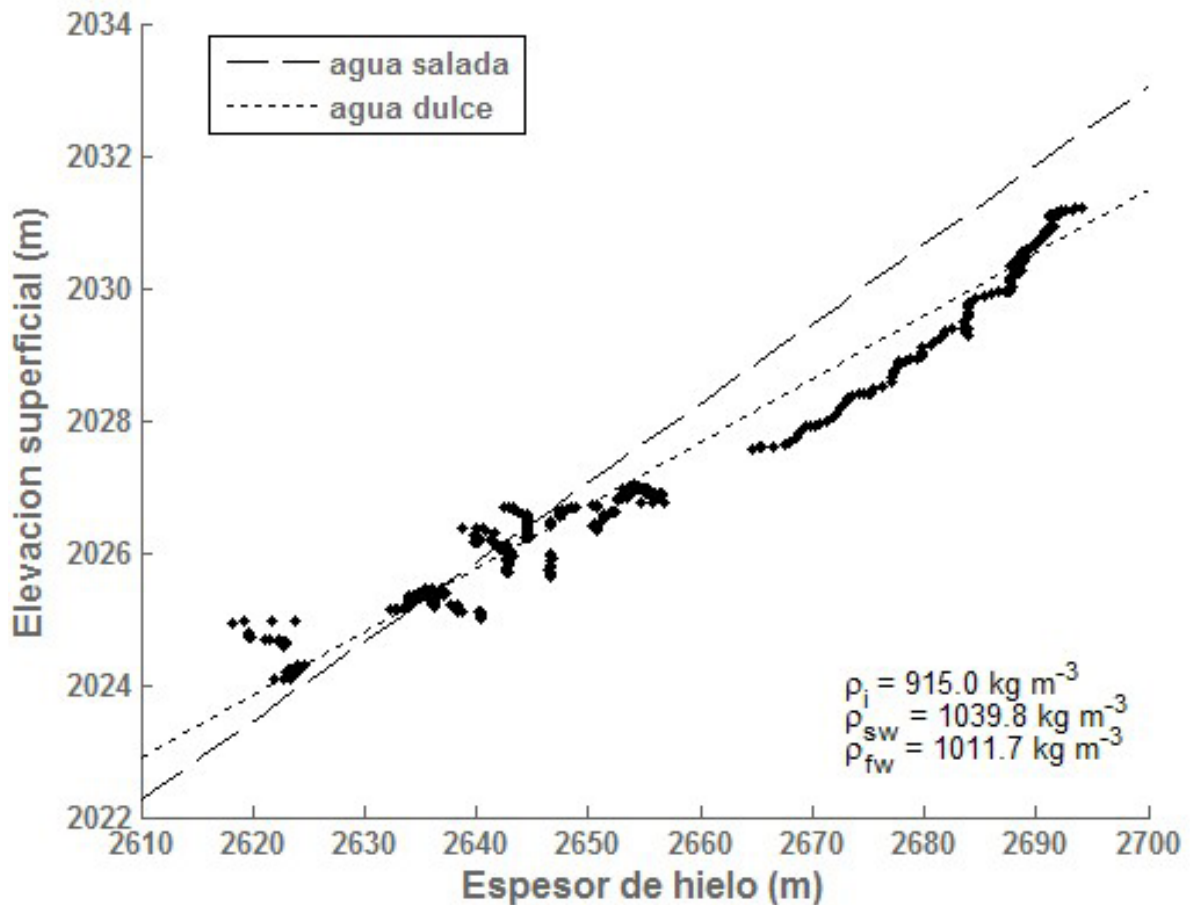


Figura 8. Estimación de la densidad de agua del lago.

a una profundidad de 2653 m y tiene un área estimada mínima de 15.6 km². Los datos disponibles del satélite ICESat obtenidos sobre la zona del lago no muestran grandes desplazamientos verticales, lo que indica que el lago ha sido estable en las últimas dos décadas. Esto último implica que el tiempo de residencia del agua puede ser de larga data, lo cual hace del Lago CECs un buen candidato para una posible perforación con fines de extracción de muestras. Para la continuación de estudios de este lago, es necesario medir su profundidad y la posible presencia de sedimentos sublacustres, todo lo cual se puede obtener con mediciones sísmicas, las que se espera realizar a fines del año 2016.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el CECs y el programa de financiamiento basal de CONICYT. Se agradece a Marcos Gaete y Jorge Hernández por el procesamiento de datos.

REFERENCIAS

- Carter, S. P., Blankenship, D. D., Peters, M. E., Young, D. A., Holt, J. W. y Morse, D. L. (2007). Radar-based subglacial lake classification in Antarctica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(3). doi:10.1029/2006GC001408
- Fretwell, P., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G., Bamber, J. L., Barrand, N. E., Bell, R.,... Zirizzotti, A. (2013). Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, 7(1), 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013
- Fricker, H. A., Scambos, T., Bindshadler, R. y Padman, L. (2007). An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space. *Science*, 315, 1544–1548. doi: 10.1126/science.1136897
- Kapitsa, A. P., Ridley, J. K., Robin, G. de Q., Siegert, M. J. y Zotikov, I. A. (1996). A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica. *Letters to Nature*, 381, 684–686. doi:10.1038/381684a0
- National Research Council. (2007). *Exploration of Antarctic subglacial aquatic environments: Environmental and scientific stewardship*. NRC Press, Washington, D.C., NRC Press.
- Oberreuter, J, Uribe, J., Zamora, R., Gacitúa, G. y Rivera, A. (2014). Mediciones de espesor de hielo en Chile usando radio eco sondaje. *Geoacta*, 39(1), 108-122.
- Rivera, A., Zamora, R., Uribe, J., Jaña, R. y Oberreuter, J. (2014). Recent ice dynamic and surface mass balance of Union Glacier in the West Antarctic Ice Sheet. *The Cryosphere*, 8(4), 1445-1456. doi:10.5194/tc-8-1445-2014
- Rivera, A., Uribe, J., Zamora, R. y Oberreuter, J. (2015). Subglacial Lake CECs: Discovery and in situ survey of a privileged research site in West Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 1–10. doi:10.1002/2015GL063390
- Scambos, T., Haran, T., Fahnestock, M., Painter, T. y Bohlander, J. (2007). MODIS-based mosaic of Antarctica (MOA) data sets: Continent-wide surface morphology and snow grain size. *Remote Sensing of Environment*, 111(2-3), 242–257. doi: 10.1016/j.rse.2006.12.020
- Siegert, M. J., Dowdeswell, J. A., Gorman, M. R. y McIntyre, N. F. (1996). An inventory of Antarctic sub-glacial lakes. *Antarctic Science*, 8(3), 281–286.
- Siegert, M. J., Le Brocq, A. y Payne, A. J. (2007). Hydrological connections between Antarctic subglacial lakes, the flow of water beneath the East Antarctic Ice Sheet and implications for sedimentary processes. *Glacial Sedimentary Processes and Products*, Publication 39 of the International Association of Sedimentologists. doi:10.1002/9781444304435.ch1
- Tulaczyk, S., Mikucki, J. A., Siegfried, M. R., Priscu, J. C., Barcheck, C. G., Beem, L. H.,... The Wissard Science Team. (2014). WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: Scientific operations and initial observations. *Annals of Glaciology*, 55(65), 51–58. doi: 10.3189/2014AoG65A009
- Uribe, J., Zamora, R., Gacitúa, G., Rivera, A. y Ulloa, D. (2014). A low power consumption radar system for measuring ice thickness and snow/firn accumulation in Antarctica. *Annals of Glaciology*, 55(67), 39–48. doi:10.3189/2014AoG67A055
- Vaughan, D. G., Rivera, A., Woodward, J., Corr, H. F. J., Wendt, J. y Zamora, R. (2007). Topographic and hydrological controls on Subglacial Lake Ellsworth, West Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 34(18), L18501. doi:10.1029/2007GL030769
- Wright, A. P., Siegert, M. J., Le Brocq, A. M. y Gore, D. B. (2008). High sensitivity of subglacial hydrological pathways in Antarctica to small ice-sheet changes. *Geophysical Research Letters*, 35, L17504. doi:10.1029/2008GL034937
- Wright, A. y Siegert, M. (2012). A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science*, 24(6), 659–664. doi: 10.1017/S095410201200048X

CLIMBING FOR SCIENCE AND ICE: FROM HANS KINZL AND MOUNTAINEERING-GLACIOLOGY TO CITIZEN SCIENCE IN THE CORDILLERA BLANCA

Escalando por la Ciencia y el Hielo: De Hans Kinzl y Montañismo-Glaciología a Ciencia Ciudadana en la Cordillera Blanca

Mark Carey¹, Rodney Garrard², Courtney Cecale³, Wouter Buytaert⁴, Christian Huggel⁵, and Mathias Vuille⁶

¹ Robert D. Clark Honors College and Environmental Studies Program, University of Oregon, USA

² Institute of Geography and Centre for Development and Environment, University of Bern, Switzerland

³ Department of Anthropology, University of California, Los Angeles, USA

⁴ Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London, UK

⁵ Department of Geography, University of Zurich, Switzerland

⁶ Department of Atmospheric & Environmental Sciences, University at Albany, New York, USA

ABSTRACT

Observing and monitoring glacier changes and glacier-related risks is challenging given the rapid rate of environmental and societal changes in mountain regions, such as the Peruvian Andes and, in particular, the Cordillera Blanca with a deadly history of glacial lake outburst floods (GLOFs) and ice/rock avalanches. It is crucial not only to analyze these dynamic conditions through remote sensing, but also through fieldwork and glaciological research on the ice itself. However, with the relatively few professional researchers and the still-limited resources of the Peruvian government—particularly its National Institute for Research on Glaciers and Mountain Ecosystems (INAIGEM) and Glaciology and Hydrologic Resources Unit (UGRH)—it is not always possible to monitor and study in detail all of the country's dynamic glacial environments. Examining both the historical practices of combined mountaineering and glaciology activities, as exemplified by Dr. Hans Kinzl's work in Peru from the 1930s to the 1960s, and recent advances in citizen science, this paper shows how the combination of mountaineering and glaciology has yielded useful information about glacier change and glacier-related hazards. Observations and even data collection from the mountaineering community that includes climbers, guides, and porters has contributed to glaciological research and diversified glacier knowledge, with the ideal end result being increased knowledge generation and sharing, expanded public awareness, reduced risk of glacier-related disasters, and improved environmental management to help a broad range of stakeholders.

Keywords: *History of glaciology, environmental history, mountaineering, climbing, citizen science, glacial lake outburst flood (GLOF), Peru*

RESUMEN

Observar y monitorear cambios glaciares y riesgos relacionados a glaciares constituye un reto dada la rápida velocidad de los cambios ambientales y sociales en regiones montañosas, tal como en los Andes peruanos, y en particular la Cordillera Blanca, con una historia mortífera de aluviones (flujos por desbordes violentos de lagunas glaciares, o GLOFs por sus siglas en inglés) y por avalanchas de hielo y roca. Es crucial analizar estas condiciones dinámicas no solamente por percepción remota, sino también por estudios de campo e investigaciones glaciológicas en el hielo mismo. Sin embargo, con los relativamente pocos investigadores profesionales y los recursos todavía limitados del gobierno peruano, particularmente de su Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y de la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), no siempre es posible monitorear y estudiar en detalle todos los dinámicos ambientes glaciares del país. Examinando las prácticas históricas de actividades que combinaron el montañismo y la glaciología, como el trabajo del Dr. Hans Kinzl en el Perú en las décadas entre 1930 y 1960, y los avances recientes en la ciencia ciudadana, este artículo muestra cómo la combinación del montañismo y la glaciología ha producido información útil acerca de los cambios en glaciares y los peligros relacionados a ellos. Las observaciones e incluso los datos recogidos por la comunidad de montañistas, que incluye escaladores, guías y porteadores, han contribuido a la investigación glaciológica y han diversificado el conocimiento de los glaciares, cuyo resultado final ideal es el aumento y el compartir del conocimiento generado, la ampliación de la conciencia pública, la reducción del riesgo de desastres relacionados con glaciares, y la mejora en el manejo ambiental para ayudar a un amplio rango de grupos interesados.

Palabras clave: *Historia de la glaciología, historia ambiental, montañismo, andinismo, ciencia ciudadana, aluvión, Perú*

INTRODUCTION

Glacier change in mountain regions creates environmental hazards such as landslides and glacial lake outburst floods (GLOFs), hydrologic changes, unstable terrain for climbing and tourism, and other dynamic conditions that affect nearby societies and visitors (Vuille et al., 2008; Huggel et al., 2015; Haeberli and Whiteman, 2014). These changes can be difficult to monitor, thereby endangering people and triggering, at times, deadly consequences. In Peru, efforts to study and monitor high-mountain glacierized areas have long been carried out by a variety of government agencies, from the Control Commission of Cordillera Blanca Lakes (CCLCB) established in 1951 to the Glaciology and Hydrologic Resources Unit (UGRH) created in 1986 and ongoing today. Since the formation of the National Institute for Research on Glaciers and Mountain Ecosystems (INAIGEM) in December 2014, glacier research and monitoring work has been further centralized and significantly bolstered throughout the country. These agencies have played a particularly important role in Cordillera Blanca glacier monitoring given the long history of deadly GLOFs in the region: in 1941 (Huaraz), 1945 (Chavín de Huantar), and 1950 (Los Cedros/Huallanca), as well as catastrophic rock/ice avalanches in 1962 (Ranrahirca) and 1970 (Yungay), among others (Ames Marquez and Francou, 1995; Carey, 2014; Evans et al., 2009; Portocarrero, 1995; Zapata Luyo, 2002; Carey, 2010).

Glacier instability continues to the present day and requires consistent research and monitoring (Emmer, Vilimek, and Zapata, 2016; Portocarrero et al., 2016), such as at Lake Palcacocha which has been repeatedly declared a state of emergency during the last five years and now has more water in it than it had when its moraine dam burst catastrophically in 1941, sending a flood downstream that killed approximately 1,800 people (Carey, 2014; Wegner, 2014; Somos-Valenzuela et al., 2016). Individual scientists and engineers have also been studying the Cordillera Blanca and other Andean glaciers for decades, with research devoted generally to glacier and glacial lake hazards, glacier hydrology, glacier melt dynamics, and past glaciations. The Glaciers Project, for example, run by the University of Zurich and CARE, focuses on resolving glacier hazards through integrated approaches involving scientific studies, an early warning system, and community outreach and education in Carhuaz and at Laguna 513 in the Cordillera Blanca, and in other high-mountain Andean regions of Peru. Additionally, many local populations living near glaciers have developed their own understandings of glaciers and environmental change in mountain regions. Whether urban residents who have understood GLOF and avalanche risks to their communities (Drenkhan et al., 2015; Carey, 2014; Jurt et al., 2015), or Quechua-speaking peoples who conceive of “enchanted lakes” that help influence human behavior with some glacierized landscapes (Walter, 2003), or indigenous ice collectors who analyze glaciers to cut blocks of ice for the flavored ice drinks called *raspadillas* (Dunbar and Medina Marcos, 2012), or farmers who understand water flowing out of Andean glaciers to utilize for crops, pastures, and drinking (Brugger et al., 2010; Paerregaard, 2013; Rasmussen, 2015; Bury et al., 2011)—these diverse local populations have also been involved with analyzing glacier change and evaluating risks in the Andes, as elsewhere

(e.g., Brugger et al., 2013; Drew, 2012; Nüsser and Baghel, 2014; Williams and Golovnev, 2015). Despite all these and other efforts to investigate and monitor glacier conditions in Peru, buttressed by technologies like GPS and satellite imagery, the high-mountain environment can still change fast enough to generate uncertainty and risks.

This paper provides historical perspective on knowledge production and glacier-related risks in the Cordillera Blanca to show how mountaineering and glaciology have at times provided useful information about glacier change and glacier-related hazards. The mountaineering community’s observations and data collection have historically and up to the present—in fact, increasingly so in recent years through “citizen science” programs—contributed to glaciological research and diversified glacier knowledge. Ideally, the end results of these contributions are increased knowledge generation and sharing, expanded public awareness, reduced risk of glacier-related disasters, and improved environmental management to help a broad range of stakeholders and groups. This paper focuses on these contributions from the mountaineering community, recognizing that many types of local knowledge are also important but are beyond the scope of this study. There is a long history of merging mountaineering and glaciology—from the nineteenth-century European foundations of the scientific discipline of glaciology, to twentieth-century mountaineering-glaciology research expeditions, to more recent programs in citizen science among mountaineers. In Peru, joint mountaineering-glaciology expeditions occurred in the Cordillera Blanca beginning in the 1930s, as exemplified by University of Innsbruck geography professor Hans Kinzl. He conducted extensive Cordillera Blanca glacier research, among other studies and in other regions. Kinzl’s early maps of the Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash were notable accomplishments as some of the first detailed maps of those mountain ranges (see Figure 1)—not to mention the mountaineering accomplishments, such as the first ascent of Mount Huascarán South in 1932, by his German and Austrian Alpine Club team members (Byers, 2000; Carey, 2012; Neate, 1994). But then, by the 1960s, even as mountaineer-scientists kept climbing and studying glaciers, glaciology and mountaineering became more divided—with deadly consequences. More recently, citizen science initiatives from climbing organizations have helped rekindle a connection between mountaineering and glacier knowledge production. These new developments in citizen science, as researchers investigating other regions and topics have indicated (Buytaert et al., 2016; Gura, 2013), have the potential moving forward to help uncover and chronicle dynamic landscape changes, collect useful environmental data, and provide timely reports about hazards to protect people and to help support effective global change adaptation.

On the one hand, those who travel, climb, and work among the world’s glaciers—particularly mountaineers, guides, and porters who experience the ice directly—can add a great deal of information about these mountains and glaciers. Yet, on the other hand, these mountaineers and other high-mountain visitors are not automatically scientists simply because they spend time in the mountains. Moreover, it is important to consider that knowledge production—including the co-production of scientific and vernacular knowledge about glaciers (Sörlin, 2011)—is always embedded in societal contexts (including inequalities among social groups) and often-unequal power

dynamics. The mountaineers in Peru, who are mostly foreigners, frequently come with expensive equipment and resources unattainable for most segments of Peruvian society. Peruvian porters, by contrast, generally participate in mountaineering not for recreation but rather for the job, out of economic necessity for employment rather than during free time or for leisure, thereby revealing differences in motivation and capacity for citizen science programs. The contrasts between mountaineers and local groups are thus crucial considerations in citizen science programs because of several factors: mountaineers' unique access to both equipment and free-time for recreation and citizen science projects, the different type of knowledge and information they can collect that contrasts with local knowledges, their access to particular constituencies such as policymakers and NGOs in Peru and internationally, and the fact that local porters and guides work with and assist most mountaineers, thereby co-producing the data and environmental observations even when porters and guides do not necessarily write the reports, compile the data in Excel, or give public lectures in Huaraz or Lima (Driver, 2000; Konishi, Nugent and Shellam, 2015; Livingstone, 2003; Raj, 2007; Ortner, 1999). Finally, the type of knowledge from the mountaineering community is only one aspect of the many knowledges created and circulated, but it can nonetheless contribute to broader understandings of glacier change and mountain hazards.

Glaciology and Mountaineering Roots

Hans Kinzl and his three German-Austrian Alpine Club expeditions to Peru during the 1930s stemmed from a long trend of linking mountaineering and science that began with early origins of both mountain climbing and the field of glaciology in the eighteenth century (Fleming, 2000; Hansen, 2013). Horace-Benedict de Saussure was one of the early advocates and practitioners of mountaineering-glaciology. A Swiss aristocrat, naturalist, botanist and geologist, de Saussure was obsessed with Mont Blanc and put up a reward for its first ascent. He would eventually summit Mont Blanc in 1787, a year after its first ascent. He did not just climb the peak though: he hired eighteen guides to transport bulky scientific equipment and lavish provisions to the top. De Saussure's scientific observations and description of the region's glaciers and complex geology were published in *Voyages dans les Alpes* (1779-96). The book laid the foundation for his reputation as the father of alpinism, also making Mont Blanc a fertile field for the study of glaciers. De Saussure was the first of the climber-scientists marrying mountaineering with glaciology.

From the end of the eighteenth century until the middle of the nineteenth century, before mountaineering took off as a sport, it was primarily Swiss, Italian, and a few French and British scientists who climbed peaks and studied glaciers in Europe. In particular, the Swiss-born and European-trained biologist and geologist Louis Agassiz studied the glaciers of the Chamonix Valley. He, too, combined climbing with science. In 1840, he set up a camp on the Unteraar Glacier in Switzerland, under an overhanging slab of rock, wedged next to some large boulders, at the end of a three-hour hike on the glacier (Steiner, Zumbühl and Bauder, 2008). When it became Agassiz's summer field camp for glacier research—and with a steady stream of visiting scientists—it became known as the “Hôtel des Neuchâtelois.” Agassiz

measured the hut's voyage down the mountain on top of the glacier. In two years, it had moved 486 feet downhill. He also hauled a host of instruments and tools out to his “hotel” to systematically study and measure the glacier, particularly its motion. He bored holes into the ice to test flow at different depths, and he pounded wooden stakes all over the glacier to measure its pace. Living on the ice at the Hôtel des Neuchâtelois proved that innovative glaciological research stemmed from personal interactions with glaciers, time at high elevation, and expertise in mountaineering. Mountaineering and glaciology had been linked, and even reinforced each other, by the mid-nineteenth century (Hevly, 1996).

Those first ascents of Mont Blanc—and the broader link between mountaineering and glaciology—had another dimension to them beyond science and recreation: they were inextricably linked to the political climate of the time and the struggle over sovereignty in Chamonix and Geneva. Mountaineering and exploratory sciences would subsequently maintain and strengthen these connections, demonstrating that nineteenth- and twentieth-century mountaineering and geographical research were often tied to government expansion, economic agendas or imperial projects (Driver, 2000; Ellis, 2001; Ortner, 1999; Lefebvre, 2005; Poole, 1998). Knowledge acquired by mountaineer-scientists, after all, facilitated the understanding of glaciology and made landscapes legible (that is, governable and exploitable) through science. When the first German and Austrian Alpine Club expedition arrived in Peru in 1932, Germany was sending exploratory mountaineering-science expeditions to other regions as well. As Harald Höbusch (2002) explains, “between 1928 and 1939 German expeditions repeatedly traveled to such remote locations as the Andes, the Pamir and, most importantly, the Himalayas. Alpine historians have attributed this shift from a local to a global focus in German mountaineering to two related causes: first, to a chauvinist attitude of competition fueled by British attempts at Mount Everest . . . ; second, and more importantly, to the desire among German mountaineers for the reconstitution of their nation as a recognizable European (and even world) power in the decade immediately following World War I” (Höbusch, 2002: 50). Despite these contexts for mountaineering-glaciology in the Andes, when Kinzl arrived on his first expedition in 1932, he followed a different path and worked more closely with the educated, urban, and wealthier classes of Peruvians—as well as with local and regional authorities—to generate useful glaciology studies and successful mountaineering accomplishments.

Hans Kinzl and the German-Austrian Alpine Club in Peru

Hans Kinzl was born in 1898 in St. Florian, Austria, where he could gaze out at the Alps on the horizon—a view that drew him to high mountains for the rest of his life. After serving in World War I, during which he was ambushed and shot in the right hand on Christmas Eve of 1917, he was able to combine his passion for mountains and intellectual rigor through graduate work in geography. By the time the first German Alpine Club expedition of 1932 was taking shape under the leadership of German mountaineer Philipp Borchers, Kinzl had become a professor at the University of Heidelberg (he subsequently moved to the University

of Innsbruck). Upon returning from a trip to the North Sea with his students in 1930, Kinzl received a letter asking if he wanted to join the Andean Expedition—which he was thrilled to do to see and study some of “the most beautiful high mountains in the world” (Kinzl, 1935; Penz, 1997-98).

The three German-Austrian Alpine Club expeditions of the 1930s to the Andes showcased what was so valuable about the link between mountaineering and science (Carey, 2012). During the 1932, 1936, and 1939 expeditions, the teams made first ascents of 15 peaks above 6,000 meters, including Huascarán (6,768 meters) in the Cordillera Blanca and Siulá (6,344 meters) in the Cordillera Huayhuash. As a professional geographer, Kinzl was doing more in the Andes than climbing peaks—producing some of the first maps of these ranges (see Figure 1), studying Andean flora and fauna, evaluating the causes and consequences of a glacial lake outburst flood, analyzing the dynamics of glacier retreat (long before the general public and even most scientists starting paying attention to global warming), and taking 16,000 photographs of the Cordillera Blanca (Kinzl, 1940c; Kinzl and Schneider, 1950; Kinzl, Schneider and Awerzger, 1954). Kinzl and his companions—including the famous mountaineer Erwin Schneider, one of Europe’s top climbers—had won significant acclaim in both Peru and Europe. But Kinzl was most proud of his beautiful maps and scientific studies of glacier forms, movement, and positions. His glacier research, it turned out, continued to be useful for documenting long-term Cordillera Blanca glacier change (e.g., Georges, 2004). Kinzl’s teams also mapped the northern and southern Cordillera Blanca. Twenty years later, Heinrich Klier, the leader of an Austrian expedition to the Cordillera Huayhuash, was still fawning over these maps, saying “Our whole expedition had been based on this map [of Kinzl’s], which, according to Prof. Arnold Heim, is the best of its kind in South America, and really constituted a scientific and touristic accomplishment of the first order” (Klier, 1955: 169)

Kinzl’s research is notable because he provided one of the first detailed scientific descriptions of a GLOF, which occurred in 1938 at Lake Pakliashcocha in the Uta Canyon of the Cordillera Blanca (Kinzl, 1940b). The flood killed livestock and damaged bridges, irrigation canals, crops, and pastures, but there were no fatalities. Kinzl noted that “glacial lakes represent certain dangers for the Cordillera [Blanca] valleys and the people directly at the foot of the mountain range,” thereby offering one of the earliest warnings about GLOF risks in Peru, even before the catastrophic 1941 Huaraz outburst flood from Lake Palcacocha. But at the same time, in 1940 he did not see practical ways to prevent GLOFs and protect the exposed populations because he believed that retaining walls in valley towns were the only disaster prevention option, something he saw as expensive and potentially ineffective. At that point, the Peruvian government had not yet started draining glacial lakes and building artificial dams to reinforce moraine dams (Carey, 2014).

While Kinzl was studying Peruvian glaciers and glacial lakes, he also faced other risks personally. In one case, in 1939, he barely escaped an avalanche that engulfed part of his climbing team on Mount Huaytapallana in central Peru. Three days after the avalanche, while Kinzl was still mourning the loss of his companions, Germany invaded Poland to start the Second World War. Peru immediately broke diplomatic ties with Germany, turning Kinzl into a

virtual political refugee, unable to take public transportation back to Innsbruck to reconnect with his wife, Hedwig. After a year of plotting clandestine escapes from his exile in Peru, he was finally able to slip onto a Japanese freighter, taking whatever gear, photographs, and scientific records he could carry on his own. From Japan he made it to China, then into the Soviet Union, onto the Trans-Siberian Railway, and eventually, in spring 1941, back to Innsbruck (Leidlmair, 2003-2007; Penz, 1997-98; Neate, 1994). After the war, Kinzl came under the scrutiny of the Denazification Commission for his mountaineering activities between 1938 and 1945. The Commission evaluated whether his Andean mountaineering and scientific studies had been an arm of Nazi expansion and Democratic Socialism. Kinzl was cleared of any wrongdoing.

Kinzl had managed to escape from Peru just in time because mountaineers were coming under increased scrutiny in Peru during the war. As he was traveling back to Innsbruck, the U.S. military attaché stationed in Peru became agitated about two other German mountaineer-scientist-photographers, the brothers Franz and Edgar Eichorn, who had been traveling around Peru, and even into the jungle along the banks of the Amazon River, far from any glacier-clad peaks. The German government had helped pay customs duties for the climbers’ photographic equipment and scientific instruments, which raised significant concerns among authorities—and in particular for Mr. Ent, the U.S. military attaché in Peru. He wondered in a military intelligence report why “two technical experts in good health, in their 50’s, have to circle the globe with equipment for taking photographs and to study mountain climbing—in Iquitos—during a time when their country is engaged in a struggle of life and death and is in need of men, young and strong, and above all technical experts?” (Carey, 2012: 123). For Mr. Ent and other authorities, the mountaineer-scientists such as the Eichorn brothers—and likely Kinzl, if he had not already escaped—were “dangerous” because climbing mountains was more than just sport and recreation. It was the information, records, photographs, maps, studies of the natural world (and natural resources), and their information about inhabitants and their relationships with the high mountains that concerned the authorities. In other words, it was the integration of climbing and science that made them truly valuable, unique, and—for Mr. Ent—so threatening to U.S. national security and the Allied forces.

Within Peru, Kinzl became for some a legend for his studies of glaciers and glacial lakes—as exemplified in the many laudatory newspaper editorials and engineering reports, and by regional authorities who invoked Kinzl in their pleas for help from Lima to understand and contain glacial hazards. Kinzl’s 1940 analysis of the Pakliashcocha GLOF recognized that Cordillera Blanca glacial lakes threatened residents and infrastructure in the region (Kinzl 1940b). A year later his worries became reality: glacial Lake Palcacocha, which he had photographed in 1939 (see Figure 2), burst over and through its moraine dam, generating a tsunami-like flood that killed 1,800 people in the city of Huaraz (Carey, 2014; Wegner, 2014). Within days of the catastrophe, many Callejón de Huaylas residents were complaining in newspapers and town meetings that authorities had ignored Kinzl’s warnings. But local residents’ veneration of Kinzl as the prescient sage was also somewhat misplaced. He had, after all, concluded in his pre-1941 publications that the

floods were rare, that it was largely impossible to protect the populations without constructing enormous retaining walls in the valleys, and that the “economic value” of the upper valleys was “not sufficiently large to justify such high costs” of disaster mitigation (Kinzl, 1940b: 164). His comment about the insufficient economic value could suggest a dismissive view of the regional population. He had not yet seen, however, that it was possible for outburst floods to extend out of upper valleys and into the densely populated lower valleys of the Callejón de Huaylas. Thus, he was not necessarily saying human lives were not worth the economic investment. Rather, he could not yet even foresee that GLOFs on the scale of the 1941, 1945, and 1950 events—which killed a total of perhaps 3,000 people, destroyed towns, and obliterated the nearly-completed Cañón del Pato hydroelectric station (Carey, 2014)—could even occur. After the 1941 Huaraz disaster, Kinzl took a very different view and was by then repeatedly warning residents about outburst floods and calling for disaster prevention works at unstable glacial lakes (Kinzl and Schneider, 1950).

What had made Kinzl such a hero among the urban non-indigenous populations who wrote so eloquently about him was his combination of mountaineering feats, his systematic scientific studies, and his diplomacy and outreach to Peruvians. For one, he actually ventured into the Andean canyons, climbed on the glaciers, and reached the peaks. Other scientists at the time did not do that—some in fact refused to do it. Kinzl was not only doing both mountaineering and science, but he was also communicating and interacting directly with local and regional residents living in Yungay and Huaraz, or those owning haciendas

further up toward the glaciers. Kinzl was, however, interacting primarily with the non-indigenous population, and particularly the wealthier and more educated scientific communities, as well as regional policymakers. The Innsbruck professor became famous because he happily camped at glacial lakes, spent years traversing glaciers, learned Spanish and even some Quechua, and came to understand the Andean landscape in ways that non-mountaineering scientists never did. It is difficult to know much depth about his relationship with guides, porters, and Quechua-speaking inhabitants of the upland areas of the Cordillera Blanca. But he and his Alpine Club companions wrote about the indigenous populations favorably, offering significant praise and respect for the porters who worked with them during the 1930s expeditions—but that is praise and respect during the 1930s, in which the porters were largely invisible background labor compared to hacienda owners. Nevertheless, Kinzl published in Spanish (e.g., Kinzl, 1940a, b, c, d), gave lectures in Huaraz and Lima, and had even planted Peruvian flags on mountain summits to show respect for Peruvian policymakers and government leaders (Carey, 2012). Many indigenous residents could have held other views, of course, as they have over time had very different relationships with glaciers and mountain peaks. Some have noted how mountaineers can trespass when they go into the mountains, can violate sacred protocols, make spiritual transgressions against mountain spirits, cause glacier shrinkage by tromping on the glaciers, and, in some cases, be linked with the *pishtaco*, the mythical, evil, white-man monster roaming the mountains to suck body fat from indigenous people to grease industrial machinery in the United States and Europe (Bode, 1990; Carey, 2012; Oliver-Smith, 1969; Gose, 1994; Walter, 2003).



Figure 2. Lake Palcacocha in 1939. Photo: H. Kinzl.

Kinzl distinguished himself in the eyes of authorities, scientists, and the urban and wealthy classes he interacted with by being both a mountaineer and a “man of German science,” as one resident referred to him in a March 1, 1956, *El Departamento* newspaper editorial. Other newspapers welcomed Kinzl’s expeditions not only because of the “conquests” of mountains such as Huascarán, but also because they had calculated peaks’ height, studied geography, analyzed the geologic history of the region, and produced their “very important” maps (e.g., *El Comercio*, June 1, 1936). In a January 21, 1945, article in Lima’s *El Comercio* newspaper, a local Huaraz resident complaining about the government’s neglect of glacial lake disaster prevention programs contrasted Kinzl’s devotion and systematic analysis to what he deemed neglectful government research: “It is important to remember,” the resident proclaimed, “that more than ten years ago a German scientific commission—the most extensive and capable that has ever been in the region—lived in and explored the entire Cordillera Blanca of Ancash for a year.” Others in the government gave even higher praise to Kinzl: a decade later, in 1956, the Innsbruck professor received the Peruvian Order of Merit for his “distinguished services” to the country over two and a half decades. There were clearly benefits to spending time in the Cordillera Blanca itself, in the mountains and communities, not only for successful scientific studies about glacier retreat and GLOF threats to regional populations, but also for research diplomacy, outreach, and education.

Other Mountaineers and Glacier Research

By 1962, mountaineer-scientists were still venturing into the Cordillera Blanca but they received a rather different reception in one notable case. In 1962, there was a catastrophic rock/ice avalanche from Mount Huascarán, which destroyed several communities, including Ranrahirca in the Callejón de Huaylas, and killed thousands (Carey, 2014; Evans et al., 2009). Later that year, the U.S. mountaineer-scientists David Bernays and Charles Sawyer spent several weeks climbing and researching on Huascarán, focusing especially on Glacier 511 that had generated the fatal 1962 avalanche. Bernays was known primarily for his mountaineering accomplishments, including a first ascent of Mount Tullparaju in the Cordillera Blanca with Charles Sawyer (Bernays, 1963). Sawyer was a graduate student in geophysics at the Massachusetts Institute of Technology (MIT). But when they reported that the badly-fissured Glacier 511 could trigger yet another and even more deadly avalanche, authorities silenced the mountaineer-scientists, forced them to leave the region, and told residents to “return to your homes with your faith placed in God,” threatening anyone who spoke in favor of the mountaineers’ conclusions to be charged under the Penal Code for “disrupting public tranquility” (Guzmán Tapia, 2002). The director of the Control Commission of Cordillera Blanca Lakes, Miguel Elías Pizarro, referred to their research in a letter printed in *El Departamento* on October 2, 1962, as “a sporting adventure,” not science. Sadly, Bernays and Sawyer had been exactly right in their prediction: on May 31, 1970, a rock/ice slide from Glacier 511 on Huascarán killed nearly 8,000 people (Evans et al., 2009; Oliver-Smith, 1986). For some engineers and regional authorities during the 1960s, the value of these mountaineer-scientist perspectives had plummeted since

the time of Kinzl, even though the climbers had offered a critical—and correct—analysis of Glacier 511 and its unstable bedrock. Thousands of people paid the price for the political shift with their lives.

As mountaineering became a popular and valued form of recreation internationally, the climbers arriving in Peru no longer needed to rely on science for credibility, justification or prestige (as Kinzl had achieved), though of course glaciologists still needed mountaineering skills to keep them out of the crevasses they were studying. And at the same time, satellites, remote sensing, and GIS were gaining significant momentum after the 1970s, which some would say reduced the amount of time glaciologists spent in the mountains. At the same time in Peru, with the rise of the Sendero Luminoso (Shining Path) insurgency by the 1980s, and more specifically the Tupac Amaru Revolutionary Movement in the Callejón de Huaylas, there was a decline in scientific research and mountaineering in remote places such as the Cordillera Blanca. Further, whereas Peru’s Glaciology and Lakes Security Office was large and actively monitoring and containing unstable glacial lakes during the 1970s, by the 1980s the office had shrunk considerably and shifted its focus away from glacier hazards and toward glaciers as hydrological resources (Carey, 2014). Kinzl’s era, when “men of science” climbed mountains and studied glaciers at the basecamp, had given way to limited glacier monitoring and more politicized glacier knowledge—with potentially dangerous consequences.

Mountaineers and Citizen Science

While satellite observations have monumentally increased understanding of mountain glaciers and Alpine regions in general, they have some limitations. If the images are not ground-truthed and coupled with first-hand fieldwork analysis of environmental conditions, they can lead to misinformation—as revealed by the 2003 debacle over Lake Palcacocha in the Cordillera Blanca. In April 2003, NASA issued a press release warning about an “ominous crack” in the glacier above Lake Palcacocha (see Figure 3). “Should the large glacier chunk break off and fall into the lake,” the NASA report warned, “the ensuing flood could hurtle down the Cojup Valley into the Rio Santa Valley below, reaching Huaraz and its population of 60,000 in less than 15 minutes” (Steitz and Buis, 2003). The press release sent shock waves through Peru as worried residents, scientists, and authorities demanded details about their fate—and while tourists cancelled their plans to visit Huaraz. The lost tourism revenue was estimated in the millions as only 6,000 visitors arrived in Huaraz for the Semana Santa holiday, instead of the projected 18,000 (*El Comercio*, April 21, 2003). Kinzl had warned that these glacial lakes could trigger catastrophe, and Palcacocha had a deadly record ever since its horrendous 1941 flood. But in 2003, NASA based its analysis on satellite imagery alone, not the kind of eyewitness account that de Saussure, Agassiz, Kinzl, Bernays, Sawyer, or other scientists could have offered through observations at Palcacocha. In the end, on-the-ground analysis of Palcacocha within days of the NASA press release proved the report was wrong. The supposed crack in the glacier was a rock, Peruvian experts discovered as soon as they reached the glacier (Kaser and Georges, 2003; Carey, 2014; Kargel et al., 2011; Vilímek et al., 2005). Without on-the-ground glaciological analysis, misrepresentations of hazards and environmental change,

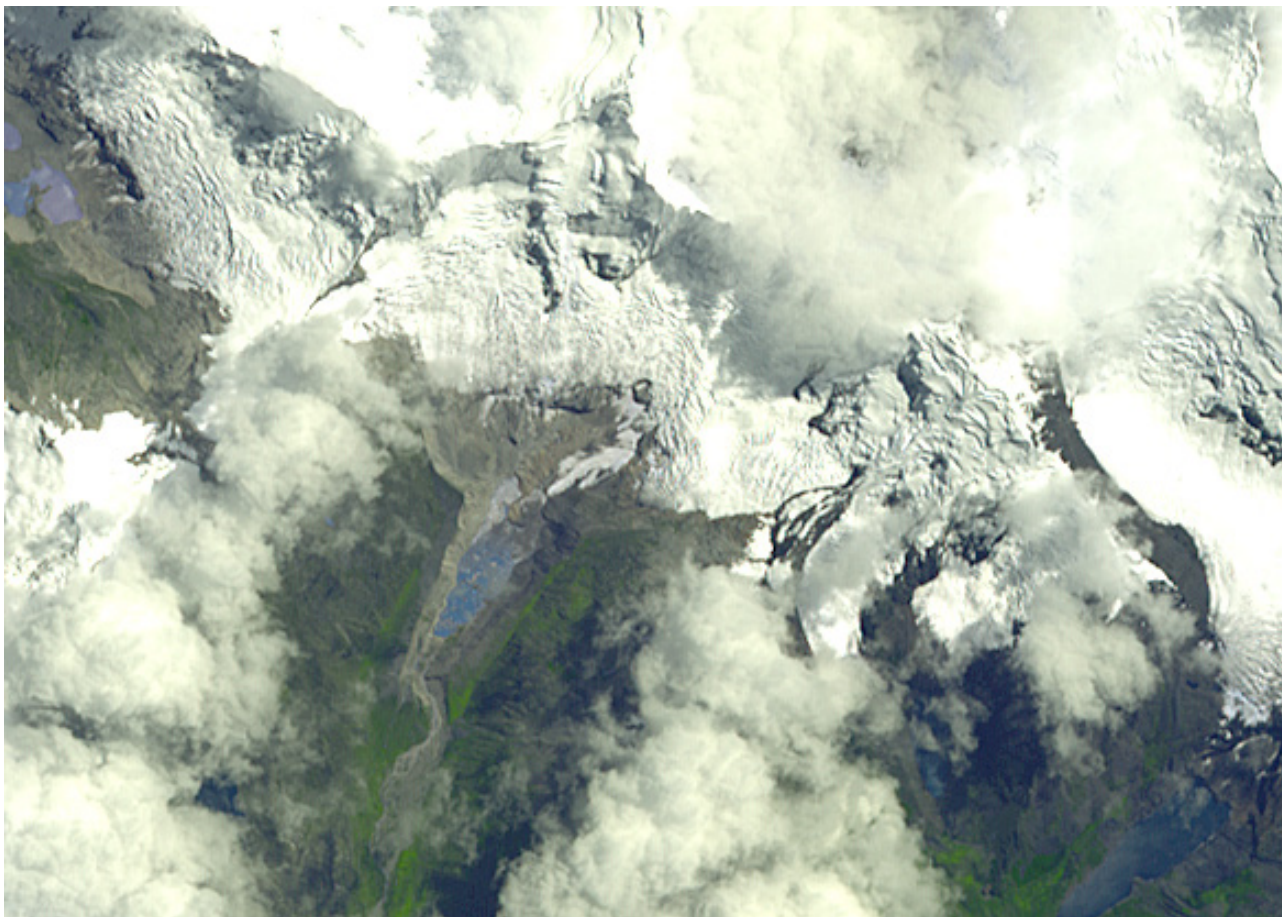


Figure 3. NASA's ASTER satellite image of Lake Palcacocha, April 2003. Note the supposed "crack" in the glacier above Palcacocha at the center of the image. Source: Steitz and Buis, 2003; <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03899>.

such as at Palcacocha, can occur with far-reaching negative consequences. Kargel et al. (2011) explain that satellite image analysis, ground and aerial observations, and ground-based instruments—all combined together—provide the most comprehensive glacier hazard monitoring.

Another way to increase glacial lake, glacier, and other mountain and environmental observations is through climber-scientist programs and the kind of work that both motivated Kinzl in the 1930s and fed the foundations of glaciology in the nineteenth century. Such a link between mountaineering and what is increasingly referred to as citizen science has the potential to help with glacier change observations and educational outreach. Local knowledge from diverse residents is obviously another source of knowledge about environmental change (e.g., Jurt et al., 2015; Walter, 2003), but here we focus on the role of citizen science among the mountaineering community, which includes not only the climbers but also guides and porters. Scientists are relatively few and cannot study and monitor every glacier system; moreover, remote sensing can fulfill important roles, but even so, as in the case with Palcacocha, cannot discern every potential threat. On the other hand, many mountaineers, and especially guides and porters, spend significant time in mountain regions and can acquire detailed environmental knowledge about rapidly changing landscapes. Even if they only have limited time or experience, mountaineers involved in citizen science programs can benefit from the educational component for themselves, learning about dynamic global environmental change in the mountains where they climb and then sharing that information with others, whether locally or back in

their home communities and countries. Kinzl was, after all, successful in the Cordillera Blanca because of his outreach, lectures, publications in Spanish, and community relations in the Callejón de Huaylas and Lima. He did not simply extract the information for himself and then leave the country, an important lesson for mountaineers and citizen science programs today.

Citizen science is a growing trend that relies on the general public—people who spend time in the outdoors—to collect and share observations about environmental conditions (e.g., Silvertown, 2009; Buytaert et al., 2014). It is frequently done in collaboration with professional scientists, thereby being part of or guided by a larger scientific project to help ensure consistency. Citizen science is motivated by the belief that people who are not technically professional scientific researchers can also collect data or report conditions to augment scientific knowledge. Furthermore, participation and data sharing can increase public awareness and engagement, leading in an ideal outcome to constructive contributions not only for knowledge production but also for government policies and environmental management (Weitkamp, 2016). Citizen science is gaining momentum, as evidenced by the creation of a new open-access journal in 2016 called *Citizen Science: Theory and Practice*. In one case of citizen science research on snow conditions in mountains, the professional scientist overseeing the program found it most productive to build a formal relationship with an outdoor education school because it created more data and more consistent and better results than simply inviting anyone going to the mountains to contribute (Dickerson-Lange et al., 2016).

Overall, citizen science has the potential to diversify and augment scientific and local knowledges by including more participants and more fields of expertise, which can have benefits for environmental management (Buytaert et al., 2016).

In places such as Peru, there is great need for glacier and high-mountain observations, data, monitoring, and other information. For one reason: glacier hazards persist. A few weeks before the 2003 NASA announcement about Lake Palcacocha, for example, the lake had overflowed due to a landslide from the lateral moraine. The lake's security dam built in 1974 was partially destroyed (see Figure 4), but the dam served its purpose: it prevented the overflow

from turning into a full-blown GLOF that could have had deadly consequences downstream in Huaraz. Experts in 2003 believed the lake was safe, but they were using data from 1974, which indicated the lake only had about a half million cubic meters of water. They also did not have in 2003 the kinds of lake observations that would have shown significant lake expansion due to the retreating glacier terminus. Recent studies show Palcacocha now has more than 17 million cubic meters of water, compared with 10–12 million cubic meters when it triggered the 1941 GLOF (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, 2003; Carey, 2014; Somos-Valenzuela et al., 2016; Vilímek et al., 2005). Experts thus vastly underestimated the amount of water in Palcacocha before the 2003 overflow. The lake today



Figure 4. Lake Palcacocha security dam in 2003 that was partially destroyed when a landslide fell into the lake and created waves that overtopped the dam. Photo: M. Carey.

is being drained very slowly with siphons (see Figure 5), which is not necessarily a permanent solution to prevent a Palcacocha GLOF but one that is at least helping to reduce risk by removing lake water. In 2010, another glacial lake, Laguna 513 in the Cordillera Blanca, triggered a GLOF when an avalanche crashed into the lake and generated 30-meter-high waves that overtopped its rock dam. The lake surface had been artificially lowered in the 1990s and was, up until 2010, believed to be secure (Carey et al., 2012; Schneider et al., 2014). That previous work likely prevented a major GLOF in 2010. In 2015, a rock/ice avalanche into Lake Huallacocha occurred, but fortunately engineers had lowered the lake level and constructed an artificial dam during the 1970s, which likely averted a GLOF in 2015 (Portocarrero et al., 2016). There is concern today that a

new lake is forming above the city of Caraz, at a site called Artesoncocha Alta, upstream of Lake Artesoncocha, which generated two GLOFs in the early 1950s that drained into and were barely contained by Lake Parón, nearly causing a cataclysmic GLOF given that Parón is the largest lake in the Cordillera Blanca (Carey, 2014). No deadly GLOF events have occurred in Peru in recent decades, but conditions are changing rapidly—as these examples demonstrate. Glacier and glacial lake changes are occurring constantly in Peru and elsewhere, and they cannot always be monitored or predicted, even with satellite imagery and remote sensing.

Worldwide, efforts are increasing to get climbers involved with science and environmental observations. The “snow and ice collection” program of Adventure Scientists

(<http://www.adventurescience.org/>), for example, trains mountaineers to collect scientific data and give back to society by sharing it with scientists. They give the data to scientific partners, who are using data to study environmental issues such as glacier melt and climate change. Since 2012, Adventure Scientists' snow and ice collection project has coordinated the collection of vertical columns of snow from the top surface of glaciers by mountaineers above 6,000 meters in the central Himalaya for the Byrd Polar and Climate Research Center at Ohio State University. The data have contributed to high-elevation glacier mass and glacier melt studies and have led to some surprising observations about top-down glacier melt. In the last few years, Adventure Scientists has recruited and trained volunteer adventurers worldwide with help from mobile apps that give users the ability to contribute to Adventure Scientists projects. Further incorporating mobile apps and other technology will be a key factor in advancing the goal of Adventure Scientists to enhance conservation by providing hard-to-obtain environmental data.

The American Climber Science Program (<http://www.mountainscience.org/>) also engages mountaineers through scientific projects, including in recent years in Peru's Cordillera Blanca. Beginning in 2011, the program's annual expeditions have called upon the expertise of volunteer climbers to collect snow and ice samples on some of the tallest, most challenging peaks in the region. Their efforts, along with their commitment to train and support local guides and students, have resulted in a substantive black carbon glacier pollution database for the entire Andean region, produced through monthly sampling on peaks such as Vallunaraju. The data are currently being processed through multiple international labs to uncover the primary sources of heat-trapping carbon, potentially leading to socio-political solutions. Schmitt et al. (2015) have published some of the results of the American Climber Science Program studies on black carbon and heat absorption on glaciers. This past summer (2016), a citizen science group with this program in the Cordillera Blanca discovered empty subway-sized tunnels



Figure 5. Palcaraju Glacier and Lake Palcacocha in 2013, with siphons removing water to reduce the possibility of a GLOF.
Photo: Paribesch Pradhan, from the Glacier Photograph Collection, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA.

under the seemingly intact Mount Andavite (Chopiraju). The insights raise questions about glacier dynamics that cannot be answered solely through satellite imagery and remote sensing. The American Climber Science Program's coordination and collaboration with mountaineering experts in Huaraz suggests yet another productive aspect of citizen science: guides and porters go repeatedly to the mountains, often on the same routes and returning frequently to the same glaciers. By working more regularly with local climbers—including guides, mountaineers, and porters—new data can continue to be revealed.

Girls on Ice (<http://girlsonice.org/>) is another type of citizen science program focusing on glacier research by the

general public. University of Alaska Fairbanks glaciologist Erin Pettit founded the Girls on Ice program that offers a unique opportunity for teenage girls without professional training in glaciology to do glaciological research, to be inspired by glacierized mountains, and to share results with various communities afterward, such as their home schools. In addition to learning mountaineering skills, the students use cameras, timers, measuring tapes, thermometers, handheld GPS, and simple filters for examining snow conditions during their field experience. A key outcome of the program is to teach the young women broadly about the scientific process: they engage in research and data collection related to glaciers but also develop a larger appreciation of science and scientific knowledge.

Other programs linking mountaineering and glaciology focus more specifically on glacier hazards, such as the Office de Haute Montagne (Mountain Information Office) and the Pôle Montagne Risk (Mountain Risk Center) in the Chamonix Valley (<http://www.chamoniarde.com>). Few alpine regions provide such an exhaustive database of mountain data due in part to the advent of new information and communication technologies. Though largely devoted to search and rescue operations in this glacier-covered region of the Alps, the Mountain Risk Center also studies snow and ice conditions to help prevent damage to life and property in the event of avalanches. Alp-Risk (<http://www.alp-risk.com/>) is another program in Europe to help link mountaineering and science by observing and reporting alpine environmental changes, especially hazards and risks posed to populations and climbers.

A major reason for the emergence of such citizen science efforts is the facilitating role of technology. The Internet in particular has led to growing availability of scientific results for large groups of people. This greatly improves coordination of efforts, exchange of information, and communication between scientists and non-scientists (Karpouzoglou et al., 2016). As a consequence, the involvement of the general public in science is increasing and will likely become more important with the emergence of well-informed knowledge societies and the ever-growing information and communication technologies. For example, mobile applications for smartphones, tablets and other gadgets can automate data collection. These technologies may also be able to incorporate important data-gathering functions, such as digital photography combined with GPS that generates photographs with geographical coordinates, time stamps, and orientation included in the metadata. The increased availability of low-cost, robust and more integrated data collection technologies gives interested people the possibility to participate in science projects (Buytaert et al., 2014). Such participation and effective use of available technologies not only advances data collection and knowledge production, but also contributes to education and awareness among the general public. The website Scistarter (<http://scistarter.com>) lists more than 600 active citizen science projects around the world, one third of which are powered by mobile apps.

As these active programs in the Cordillera Blanca and elsewhere illustrate, citizen science conducted by mountaineers, guides and porters could be useful on a number of levels in Peru. For one, INAIGEM and UGRH experts cannot observe and monitor every glacier and glacial lake. Photographs of these glacial features could be enormously helpful if they were consolidated in a central database, especially if the precise GPS coordinates, photographic orientation and time stamp could be extracted and uploaded from climber photographs. Other information could also be collected, such as data related to temperature and precipitation, ice and snow stability, water quality and quantity, glacier and glacial lake positions, ice melt rates, vegetation cover, and flood evidence. The diverse observations would be most beneficial if they could be transferred into a single database through a smartphone app that includes photographs, videos, GPS data, hydrophone recordings, weather conditions, typed notes, and other types of information that provide evidence of environmental change in high mountains. This information and data would not replace scientific studies or supplant local knowledge produced by residents living near glaciers, who have, in

many cases, developed glacier-related understandings over many generations. Foreign mountaineers often lack the kind of awareness about long-term environmental change that local residents maintain. Nor are mountaineers working in citizen science programs always trained as scientists in data collection. Further, the contrasts between the diverse local populations (including but not limited to porters and guides) and the foreign mountaineers' access to equipment, leisure time for recreation, and political authority must be recognized. As demonstrated in this paper, glacier knowledge has politics and power, from Kinzl's unheeded warnings about GLOFs to Bernays' and Sawyer's conclusions about Mount Huascarán's instability, to more recent events at Lake Palcacocha. And given the deep so-called neo-imperial roots of mountaineering and geographical knowledge (Driver, 2000; Ellis, 2001), there is a need to recognize the politics of mountaineering and glaciology today, including for successful citizen science programs.

Even in cases when citizen science mountaineering-glaciology projects do not directly benefit scientists or threatened communities living with glacier hazards and glacier runoff variability, there is still an educational value because climbers learn about key issues facing Andean residents and policymakers. Climbers in the Cordillera Blanca often complain, for instance, about the "ugly" glacial lakes that have been artificially dammed or partially drained, which thus tarnish what many of these foreigners think should be a pristine alpine environment. They often think (erroneously) that these are reservoirs for hydroelectricity generation. Instead, they are mostly disaster prevention security dams that do not regulate streamflow, but simply maintain a low water level in glacial lakes so they do not acquire too much water and overflow dangerously in a GLOF. Teaching mountaineers, in this one example, about the history of GLOFs and glacier avalanches—and particularly about the successful efforts to drain and dam 35 dangerous and supposedly ugly Cordillera Blanca glacial lakes—illustrates quite vividly to the generally foreign mountaineers how climate change and glacier retreat are playing out in Peru, with deadly and ongoing consequences requiring decades of vast engineering projects to protect the population.

CONCLUSION

Hans Kinzl argued that glaciology, geology, and the natural sciences were central to mountaineering. His point was that being in the mountains for extended periods, often with a need to evaluate ice conditions to stay alive, yielded important observations and tremendous knowledge about mountain processes. For early climbers, reaching the summit was key. But so was collecting meteorological and glaciological information, for intellectual curiosity and also survival. Bagging the peak was not enough for them—not for the founders of glaciology in the nineteenth century or for Kinzl. As such, Kinzl can be considered an early champion of citizen science in the Cordillera Blanca. The Stockholm University glaciologist Hans Ahlmann reached similar conclusions to Kinzl during the same period, realizing in the 1930s that his scientific studies in the Arctic would advance significantly by working closely with Lapland Sami, Greenland Inuit, and Icelandic farmers, who also collected data for Ahlmann's research on "polar warming" (Sörlin, 2011). Today, in the era of remote

sensing and satellite imagery—corresponding with a period of incredibly fast glacier changes—it remains crucial to do “muddy boots” fieldwork and glaciological research on ice. But with the relatively few professional researchers and the still-limited resources of the expanded INAIGEM, it is not possible to monitor and study all the dynamic glaciers in Peru. Mountaineering and citizen science projects can be useful for the natural sciences, environmental management, and global environmental change monitoring—which can all benefit from those who spend significant time on and around glaciers. The diverse range of local populations—from Quechua-speaking farmers living near glaciers and irrigating their crops with glacier runoff to urban residents who have experienced the long history of GLOFs and avalanches—also possess crucial environmental knowledge. Citizen science programs among mountaineers do not replace or threaten those other diverse knowledges, but rather add another dimension of information about rapidly changing glaciers and mountain environments. There is a persisting opportunity for mountaineers, guides and porters to provide input into this knowledge production. As Ohio State University glaciologist Lonnie Thompson reflected about the need to spend time working on glaciers, “mountains are interesting places. . . . There are a lot of words in the world of science and everyday affairs, but words don’t work on mountains; you have to experience them” (Bowen, 2005: 332).

ACKNOWLEDGEMENTS

Mark Carey’s work is partially supported by the U.S. National Science Foundation under Grant #1253779. Christian Huggel is supported by the Swiss Agency for Development and Cooperation through Proyecto Glaciares+. The paper benefited from discussions with Jeff Miesbauer and Erin Pettit.

REFERENCES

- Ames Márquez, A. and Francou, B. (1995). Cordillera Blanca glaciares en la historia. *Bulletin de l’Institut Français d’Études Andines*, 24(1), 37-64.
- Bernays, D. (1963). Tullparaju. *American Alpine Journal*, 344-354.
- Bode, B. (1990). *No bells to toll: Destruction and creation in the Andes*. New York, Paragon House.
- Bowen, M. (2005). *Thin ice: Unlocking the secrets of climate change in the world’s highest mountains*. New York, Henry Holt.
- Brugger, J., Dunbar, K., Jurt, C. and Orlove, B. (2010). Global warming and changing water resources: Perceptions of glacier retreat in mountain regions. *Anthropology News*, 51(2), 23-24.
- Brugger, J., Dunbar, K. W., Jurt, C. and Orlove, B. (2013). Climates of anxiety: Comparing experience of glacier retreat across three mountain regions. *Emotion, Space and Society*, 6, 4-13.
- Bury, J., Mark, B. G., McKenzie, J., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. and Gómez López, R. J. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1-2), 179-206.
- Buytaert, W., Dewulf, A., De Bièvre, B., Clark, J. and Hannah, D. M. (2016). Citizen science for water resources management: Toward polycentric monitoring and governance? *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(4), 01816002 (1-4).
- Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J.,... Zhumanova, M. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: Opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science*, 2(26). doi.org/10.3389/feart.2014.00026
- Byers, A. C. (2000). Contemporary landscape change in the Huascarán National Park and buffer zone, Cordillera Blanca, Peru. *Mountain Research and Development*, 20(1), 52-63.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. New York, Oxford University Press.
- Carey, M. (2012). Mountaineers and engineers: An environmental history of international sport, science, and landscape consumption in twentieth-century Peru. *Hispanic American Historical Review*, 92(1), 107-141.
- Carey, M. (2014). *Glaciares, cambio climático y desastres naturales: Ciencia y sociedad en el Perú*. Lima, Instituto Francés de Estudios Andinos / Instituto de Estudios Peruanos.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haerberli, W. (2012). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3-4), 733-767.
- Dickerson-Lange, S. E., Eitel, K. B., Dorsey, L., Link, T. E. and Lundquist, J. D. (2016). Challenges and successes in engaging citizen scientists to observe snow cover: From public engagement to an educational collaboration. *Journal of Science Communication*, 15(1), 1-14.
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J. and Oré, M. T. (2015). The changing water cycle: Climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2(6), 715-733.
- Drew, G. (2012). A retreating goddess? Conflicting perceptions of ecological change near the Gangotri-Gaumukh glacier. *Journal for the Study of Religion, Nature and Culture*, 6(3), 344-362.
- Driver, F. (2000). *Geography militant: Cultures of exploration and empire*. Oxford, Blackwell.
- Dunbar, K. W. and Medina Marcos, K. D. (2012). Singing for shaved ice: Glacial loss and raspadilla in the Peruvian Andes. In Sinclair, J. and Pertierra, A. C. (Eds.). *Consumer culture in Latin America*, 195-

205. New York, Palgrave Macmillan.
- Springer.
- Ellis, R. (2001). *Vertical margins: Mountaineering and the landscapes of neoimperialism*. Madison, University of Wisconsin Press.
- Emmer, A., Vilímek, V. and Zapata, M. L. (2016). Hazard mitigation of glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru): The effectiveness of remedial works. *Journal of Flood Risk Management*. doi:10.1111/jfr3.12241
- Evans, S. G., Bishop, N. F., Smoll, L. F., Murillo, P. V., Delaney, K. B. and Oliver-Smith, A. (2009). A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108(102), 96-118.
- Fleming, F. (2000). *Killing dragons: The conquest of the Alps*. London, Granta Books.
- Georges, C. (2004). 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 100-107.
- Gose, P. (1994). *Deathly waters and hungry mountains: Agrarian ritual and class formation in an Andean town*. Toronto, University of Toronto Press.
- Gura, T. (2013). Citizen science: Amateur experts. *Nature*, 496, 259-261.
- Guzmán Tapia, L. (2002). Pudo prevenirse tanta desgracia y muerte. In Pajuelo Prieto, R. (Ed.). *Vida, muerte y resurrección: Testimonios sobre el sismo-alud, 1970*, 173-178. Caraz, Ediciones El Inca.
- Haeberli, W. and Whiteman, C. (Eds.). (2014). *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*. Amsterdam, Elsevier.
- Hansen, P. H. (2013). *The summits of modern man: Mountaineering after the enlightenment*. Cambridge, Harvard University Press.
- Hevly, B. (1996). The heroic science of glacier motion. *Osiris*, 11, 66-86.
- Höbusch, H. (2002). Rescuing German alpine tradition: Nanga Parbat and its visual afterlife. *Journal of Sport History*, 29(1), 48-76.
- Huggel, C., Carey, M., Clague, J. and Kääb, A. (Eds.). (2015). *The high-mountain cryosphere: Environmental changes and human risks*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Jurt, C., Burga, M. D., Vicuña, L., Huggel, C. and Orlove, B. (2015). Local perceptions in climate change debates: insights from case studies in the Alps and the Andes. *Climatic Change*, 133(3), 511-523.
- Kargel, J., Furfaro, R., Kaser, G., Leonard, G., Fink, W., Huggel, C.,... Zapata, M. (2011). ASTER imaging and analysis of glacier hazards. In Ramachandran, B., Justice, C. O. and Abrams, M. J. (Eds.). *Land remote sensing and global environmental change: NASA's earth observing system and the science of ASTER and MODIS*, (Remote sensing and digital image processing, 11), 325-373. New York, Springer.
- Karpouzoglou, T., Zulkafli, Z., Grainger, S., Dewulf, A., Buytaert, W. and Hannah, D. M. (2016). Environmental Virtual Observatories (EVOs): prospects for knowledge co-creation and resilience in the Information Age. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 18, 40-48.
- Kaser, G., and Georges, C. (2003). A potential disaster in the icy Andes: A regrettable blunder. Unpublished manuscript, University of Innsbruck, Austria: <http://geowww.uibk.ac.at/glacio/index.html>.
- Kinzl, H. (1935). Aufgaben und Reisen des Geographen. In Borchers, P. (Ed.). *Die Weisse Kordillere*, 180-203. Berlin, Verlag Scherl.
- Kinzl, H. (1940a). Alpinismo-andinismo. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 57(4), 222-234.
- Kinzl, H. (1940b). La ruptura del lago glacial en la quebrada de Ulta en el año 1938. *Boletín del Museo de Historia Natural "Javier Prado"*, 4(13), 153-167.
- Kinzl, H. (1940c). Las tres expediciones del 'Deutscher Alpenverein' a las cordilleras peruanas. *Boletín del Museo de Historia Natural "Javier Prado"*, 4(12), 3-24.
- Kinzl, H. (1940d). Los glaciares de la Cordillera Blanca. *Revista de Ciencias* (Órgano de la Facultad de Ciencias Biológicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad Mayor de San Marcos), 42(432), 417-440.
- Kinzl, H. and Schneider, E. (1950). *Cordillera Blanca (Perú)*. Innsbruck, Austria, Universitäts-Verlag Wagner.
- Kinzl, H., Schneider, E. and Awerzger, A. (1954). *Cordillera Huayhuash, Perú: ein Bildwerk über ein tropisches Hochgebirge*. Innsbruck, Austria, Verlag Tiroler Graphik.
- Klier, Heinrich. (1955). Cordillera Huayhuash: Andes Expedition of the Austrian Alpine Club, 1954. In Barnes, M. (Ed.). *The Mountain World, 1955*, 169-183. New York, Harper & Brothers.
- Konishi, S., Nugent, M. and Shellam, T. (Eds.). (2015). *Indigenous intermediaries: New perspectives on exploration archives*. Canberra, Australian National University Press.
- Lefebvre, T. (2005). L'invention occidentale de la haute montagne andine. *Mappemonde*, 79(3), on line at <http://mappemonde.mgm.fr/num7/articles/art05307.html>.
- Leidlmair, A. (2003-2007). Hans Kinzl: Im Licht seines Briefwechsels, Lebenslaufes und persönlicher Erinnerungen. *Innsbrucker Geographische Gesellschaft – Innsbrucker Jahresbericht*, 142-176.
- Livingstone, D. N. (2003). *Putting science in its place: Geographies of scientific knowledge*. Chicago, Illinois, University of Chicago Press.
- Neate, J. (1994). *Mountaineering in the Andes: A*

- sourcebook for climbers* (2nd ed.). London, Expedition Advisory Centre / Royal Geographical Society.
- Nüsser, M. and Baghel, R. (2014). The emergence of the cryoscape: Contested narratives of Himalayan glacier dynamics and climate change. In Schuler, B. (Ed.). *Environmental and climate change in South and Southeast Asia: How are local cultures coping?*, 138-156. Leiden, Koninklijke Brill.
- Oliver-Smith, A. (1969). The pishtaco: Institutionalized fear in highland Peru. *Journal of American Folklore*, 82(326), 363-368.
- Oliver-Smith, A. (1986). *The martyred city: Death and rebirth in the Andes*. Albuquerque, University of New Mexico Press.
- Ortner, S. B. (1999). *Life and death on Mt. Everest: Sherpas and Himalayan mountaineering*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press.
- Paerregaard, K. (2013). Bare rocks and fallen angels. Environmental change, climate perceptions and ritual practices in the Peruvian Andes. *Religions*, 4(2), 290-305.
- Penz, H. (1997-98). Hans Kinzl (1898-1979) und das Institut für Geographie der Universität Innsbruck. *Innsbrucker Geographische Gesellschaft – Innsbrucker Jahresbericht*, 5-28.
- Poole, D. (1998). Landscape and the imperial subject: U.S. images of the Andes, 1859-1930. In Joseph, G. M., LeGrand, C. C. and Salvatore, R. D. (Eds.). *Close encounters of empire: Writing the cultural history of U.S.-Latin American relations*, 107-138. Durham, North Carolina, Duke University Press.
- Portocarrero, C. (1995). Retroceso de glaciares en el Perú: Consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(3), 697-706.
- Portocarrero, C., Cochachin, A., Frey, H., González, C., Haerberli, W. and Huggel, C. (2016). Reducing risks from hazardous glacier lakes in the Cordillera Blanca (Peru): Six decades of experience and perspectives for the future. Paper presented at the EGU General Assembly, Vienna, Austria, April. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU2016-7998.
- Raj, K. (2007). *Relocating modern science: Circulation and the construction of knowledge in South Asia and Europe, 1650-1900*. New York, Palgrave MacMillan.
- Rasmussen, M. B. (2015). *Andean waterways: Resource politics in highland Peru*. Seattle, University of Washington Press.
- Schmitt, C. G., All, J. D., Schwarz, J. P., Arnott, W. P., Cole, R. J., Lapham, E. and Celestian, A. (2015). Measurements of light absorbing particulates on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 9(1), 331-340.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. and García, J. (2014). Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, 35, 145-155.
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 467-471.
- 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, 2519-2543.
- Sörlin, S. (2011). The anxieties of a science diplomat: Field coproduction of climate knowledge and the rise and fall of Hans Ahlmann's "polar warming". *Osiris*, 26(1), 66-88.
- Steiner, D., Zumbühl, H. J. and Bauder, A. (2008). Two alpine glaciers over the past two centuries: A scientific view based on pictorial sources. In Orlove, B., Wiegandt, E. and Luckmen, B. H. (Eds.). *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society*, 83-99. Berkeley, University of California Press.
- Steitz, D. E. and Buis, A. (2003). Peril in Peru? NASA takes a look at menacing glacier. *NASA Press Release*, 11 April, on line at http://www.nasa.gov/home/hqnews/2003/apr/HP_News_03138.html.
- Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. (2003, March). Estado situacional de la laguna Palcacocha. Huaraz.
- Vilímek, V., Zapata Luyo, M., Klimeš, J., Patzelt, Z. and Santillán, N. (2005). Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. *Landslides*, 2(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.
- Walter, D. (2003). *La domestication de la nature dans les Andes péruviennes: L'alpiniste, le paysan et le Parc National du Huascarán*. Paris, Éditions L'Harmattan.
- Wegner, S. A. (2014). *Lo que el agua se llevó. Consecuencias y lecciones del aluvión de Huaraz de 1941*. Lima, Ministerio del Ambiente.
- Weitkamp, E. (2016). From planning to motivations: citizen science comes to life. *Journal of Science Communication*, 15(3), 1-5.
- Williams, C. and Golovnev, I. (2015). Pamiri women and the melting glaciers of Tajikistan. In Buechler, S. and Hanson, A. S. (Eds.). *A political ecology of women, water and global environmental change*, chapter 11. New York, Routledge.
- Zapata Luyo, M. (2002). La dinámica glaciar en lagunas de la Cordillera Blanca. *Acta Montana* (Czech Republic), 19(123), 37-60.

CAMBIO CLIMÁTICO: PASTIZALES ALTOANDINOS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

Climate Change: High Andean Rangelands and Food Security

Enrique R. Flores¹ (efm@lamolina.edu.pe)

¹Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú

RESUMEN

La Puna, una combinación de pajonales, césped de puna y bofedales de alta montaña, cumple un rol clave en la economía y seguridad alimentaria por los bienes y servicios que provee a la sociedad. La estructura y función de este ecosistema será seriamente afectado por la degradación de tierras y el cambio climático. Modelos ecológicos predicen cambios en la cobertura vegetal, productividad y capacidad de carga de los pastizales, una situación que definitivamente afectará la economía local y la disponibilidad de alimentos. En este escenario urge desarrollar políticas de conservación y manejo sostenible de pastizales que contribuyan a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero generados por la actividad ganadera. Estas políticas deberán desarrollarse bajo un marco institucional que incluya la asignación de recursos económicos a través de la creación de mecanismos de retribución de servicios ecosistémicos que involucren el compromiso y participación de decisores políticos, productores y la población.

Palabras clave: *Ecosistema, puna, degradación de tierras, pago por servicios ambientales, sostenibilidad*

ABSTRACT

The Puna, a mix of tussock grasses, short grasses and high mountain wetlands, plays a key role in the economy and food security because of the goods and services that it provides to society. The structure and function of this ecosystem will be seriously affected by land degradation and climate change. Ecological models predict changes in vegetation cover, productivity and carrying capacity of rangelands; a situation that will definitely affect local economy and food availability. In this scenario, it is necessary to develop conservation and sustainable management policies for rangelands, which contribute to mitigate greenhouse gas emissions of livestock activities. These policies should be developed under an institutional framework that includes allocation of economic resources through development of mechanisms for payment of ecosystem services, so as to involve the commitment and participation of policy makers, producers and the population.

Keywords: *Ecosystem, puna, land degradation, payment for ecosystem services, sustainability*

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha sido identificado como una de las principales fuerzas que afectan los ecosistemas naturales (Thuiller, 2007) y en especial a los paisajes montañosos. Los pastizales altoandinos, al igual que otros ecosistemas naturales, son vulnerables al incremento de la variabilidad climática y frecuencia de eventos extremos como la ausencia de lluvias o periodos repetidos de sequía (McCarthy, 2001). Estos eventos también podrían conducir a la degradación generalizada de las tierras, pérdida en la calidad y nutrientes del suelo debido a la erosión (Kassahun et al., 2008), impactando negativamente sobre la biodiversidad del ecosistema y el ciclo de vida de las plantas (Belgacem y Louhaichi, 2013).

El incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos podría tener un efecto significativo en la producción de alimentos y en la seguridad alimentaria. El cambio climático puede afectar los sistemas de producción de alimentos basados en pastizales debido a cambios negativos en la productividad de forraje para la producción ganadera (Thornton et al., 2009). El aumento proyectado de la temperatura media global y la reducción de las precipitaciones podría afectar adversamente el crecimiento de las plantas, la disponibilidad de agua, la producción pecuaria, y como consecuencia, el acceso y la disponibilidad de los alimentos, especialmente a las poblaciones más pobres de las montañas andinas.

La ecorregión Puna, una cadena de montañas altas localizadas por arriba de los de 3.800 msnm, donde se desarrolla la mayor parte de la ganadería extensiva del Perú, comprende una superficie de más de veintiún millones de hectáreas de pastizales, humedales, glaciares, cuerpos de agua y zonas de protección (Flores et al., 2014). La producción ganadera en la Puna depende de la vegetación natural de los pastizales compuestos por pajonales (gramíneas altas de baja calidad nutricional), céspedes de puna y bofedales, y recursos hídricos; y se basa en la crianza de camélidos sudamericanos, ganado vacuno y ovino (Flores et al., 2007). Esta actividad está estrechamente vinculada a la vida social y cultural de los campesinos para quienes la tenencia o propiedad de animales garantiza su estabilidad económica; sin embargo, la producción pecuaria en esta zona no está libre de limitaciones. Los ecosistemas son frágiles, la productividad de la tierra es baja, y la vulnerabilidad al cambio climático es alta (Flores et al., 2014). A pesar de ello, la Puna es una ecorregión clave para la economía nacional y local, por los

productos y servicios ecosistémicos que brinda al conjunto de la sociedad (Brown y MacLeod, 2011).

En este trabajo, se analiza el rol de los pastizales en la seguridad alimentaria, las amenazas que enfrenta este ecosistema en relación a los impactos del cambio climático y degradación, y se discute cómo se podrían atenuar los impactos del cambio climático desde una perspectiva ecológica y económica.

APORTE DE LOS PASTIZALES A LA SEGURIDAD ALIMENTARIA Y ECONOMÍA

Los medios de subsistencia y la seguridad alimentaria de las comunidades campesinas asentadas en las montañas dependen en gran medida de los recursos naturales disponibles. La agricultura y la ganadería extensiva al pastoreo son los principales medios de subsistencia, pero la crianza de ganado al pastoreo es la actividad más importante.

Los pastizales, además de proveer forraje a más del ochenta por ciento de la ganadería nacional, brindan un conjunto de servicios de provisión, regulación biodiversidad y culturales, a escala global, regional y local. Las principales contribuciones de servicios ecosistémicos

de los pastizales en una escala global son la captura de carbono y la biodiversidad de plantas y animales. En una escala regional, los pastizales favorecen la recarga de agua subterránea y la disponibilidad de agua, reduciendo los riesgos de inundaciones. Mientras que a nivel local incrementan la disponibilidad de agua, reducen la degradación de suelos y mejoran la producción de biomasa, favoreciendo la conservación de suelos y mejorando la productividad del ganado.

El servicio de provisión de carne y leche que provee la crianza de ganado en pastizales contribuye de manera sustancial a la seguridad alimentaria. Los pastizales cubren aproximadamente el 46.5% de la demanda de carne y el 23.8% de la demanda de leche (Tabla 1), proporcionando proteína en cantidades suficientes para cubrir en exceso las necesidades de la población de los niños del Perú entre los 7 meses a 3 años de edad (Flores, 2012).

La oferta de carne y leche podría duplicarse si se mejora la capacidad de carga y la productividad animal de los sistemas pastoriles y se diseñan planes de manejo sostenible que contemplen la aplicación de estrategias destinadas a mejorar el estado de conservación y el estatus ecológico de los pastizales, tal como sistemas de pastoreo, revegetación con especies nativas, siembra de pastos cultivados, manejo del agua y preservación de la biodiversidad (Lau, 2010).

Alimento	Producción (t)	Consumo (t)	Contribución (%)
Carne	102,361.1	220,068.0	46.5
Leche	529,166.9	2'225,649.0	23.8

Tabla 1. Contribución de los pastizales andinos a la demanda nacional de carne y leche. Fuente: Flores (2012).

La desnutrición crónica es un fenómeno extendido en los Andes, uno de cada cuatro niños menores de cinco años sufre desnutrición crónica (Segura et al., 2002). Sin embargo, el acceso de las poblaciones a una mayor cantidad de alimentos podría mejorarse aún más si el valor económico de los servicios de provisión se mejora y se implementan programas de pago por servicios ambientales claves (regulación del ciclo hídrico y control de la erosión), y si se desarrollan programas de manejo sostenible con participación de las comunidades campesinas, propietarias de la mayoría de los pastizales, tal como se aprecia en la siguiente tabla.

Como revela la Tabla 2, el valor económico total estimado para un escenario de manejo tradicional fue de US\$ 0.84 dólares/ha/año, en cambio un pastizal manejado sosteniblemente genera más bienes y servicios ambientales y su valor económico suma US\$ 14.09 dólares/ha/año, revelando que la sociedad en su conjunto podría mejorar su bienestar y que este valor, más allá de los problemas metodológicos, podrá convertirse en un incentivo para el manejo sostenible del pastizal.

La contribución potencial de los pastizales a la seguridad alimentaria no está libre de amenazas; procesos tales como la degradación y la pobreza rural interactúan ocasionando

Sistema	Área (ha)	Producción ganadera	Regulación caudal	Captura carbono	Valor de opción de producción de alpacas	Valor total
Manejo Tradicional	3.562	0.84	0.00	0.00	0.00	0.84
Manejo Sostenible	3.562	1.49	0.51	9.04	3.05	14.09

Tabla 2. Valor económico de bienes y servicios del ecosistema bajo dos sistemas de manejo de praderas nativas altoandinas (\$/ha/año). Fuente: Huerta y Flores (2002).

un mayor efecto sinérgico, lo que, sumado a la variabilidad climática y topográfica inherente a los ecosistemas de montaña, podría explicar por qué estas regiones presentan mayores índices de vulnerabilidad nutricional que otras de menor altitud y paisaje menos complejo.

La degradación de los pastizales altoandinos, 14.9 millones de hectáreas, es un fenómeno bastante extendido; más del 40% de las áreas de pastoreo están en condición pobre y en franco proceso de deterioro debido al sobrepastoreo y mal manejo (Zarria y Flores, 2015). Proyecciones indican que,

si no se implementan estrategias de mejora de pastizales, para el 2070 la superficie de pastizales de condición pobre podría aumentar en un 20% con la consecuente pérdida del potencial del sistema ecológico para cubrir la demanda de leche y carne (Flores, 2012). Esta reducción en la productividad podría incrementar la dependencia de alimentos provenientes de fuentes externas, exponiendo a las comunidades a las fluctuaciones del mercado (Rasul y Hussain, 2015).

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Un análisis del escenario de cambio climático del año 2050 en los Andes centrales prevé un aumento de la temperatura promedio en verano de 1.3°C (0.28°C/década), la disminución de la humedad relativa (6%) y de la precipitación (15%), y el aumento de la variabilidad y amplitud diurna de la temperatura en 1°C (Martínez et al., 2006). Condiciones que ocasionarían el retroceso glaciar y la reducción del agua disponible, cambios en la composición florística, menor producción de forraje y disminución del caudal de los cursos de agua. Estos cambios en los procesos y condiciones del ecosistema sumadas al incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos podrían dar lugar a cambios en la estabilidad y resiliencia del sistema ecológico y disminución del flujo base durante la estación seca (Vuille, 2013).

Los pajonales, bofedales y arbustales cambiarán su superficie debido al efecto del retroceso glaciar, al aumento en los índices de temperatura, y a la expansión de áreas agrícolas (Figura 1).

Los pajonales reducirían su extensión de 15.4 a 4.6 millones de hectáreas, la superficie cubierta por bofedales se reduciría de 0.5 a 0.2 millones de hectáreas. Mientras que los arbustales, vegetación dominada por plantas leñosas de porte bajo e intermedio, incrementarían sustancialmente su extensión de 2.8 a 7.1 millones hectáreas (Figura 2), lo que causará la disminución de la carga animal y del aporte de la ganadería a la economía nacional, pues los arbustales toleran menores niveles de uso y producen menos forraje que los otros tipos de vegetación (Figura 3).

La ganadería, además de enfrentar situaciones adversas, como los cambios en la cobertura vegetal antes descritos, que reducen la disponibilidad de forraje para el ganado, tiene grandes desafíos, pues además de proveer alimentos a la población, debe mitigar sus impactos en el ambiente (Nieto et al., 2014). El Perú emite aproximadamente 120 MtCO₂-eq. anuales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), correspondiendo al sector agropecuario aproximadamente 22.5 MtCO₂-eq., 18.8% del total de emisiones, de las cuales 46.2% es generado por la ganadería y la diferencia por la agricultura (Flores, 2012).

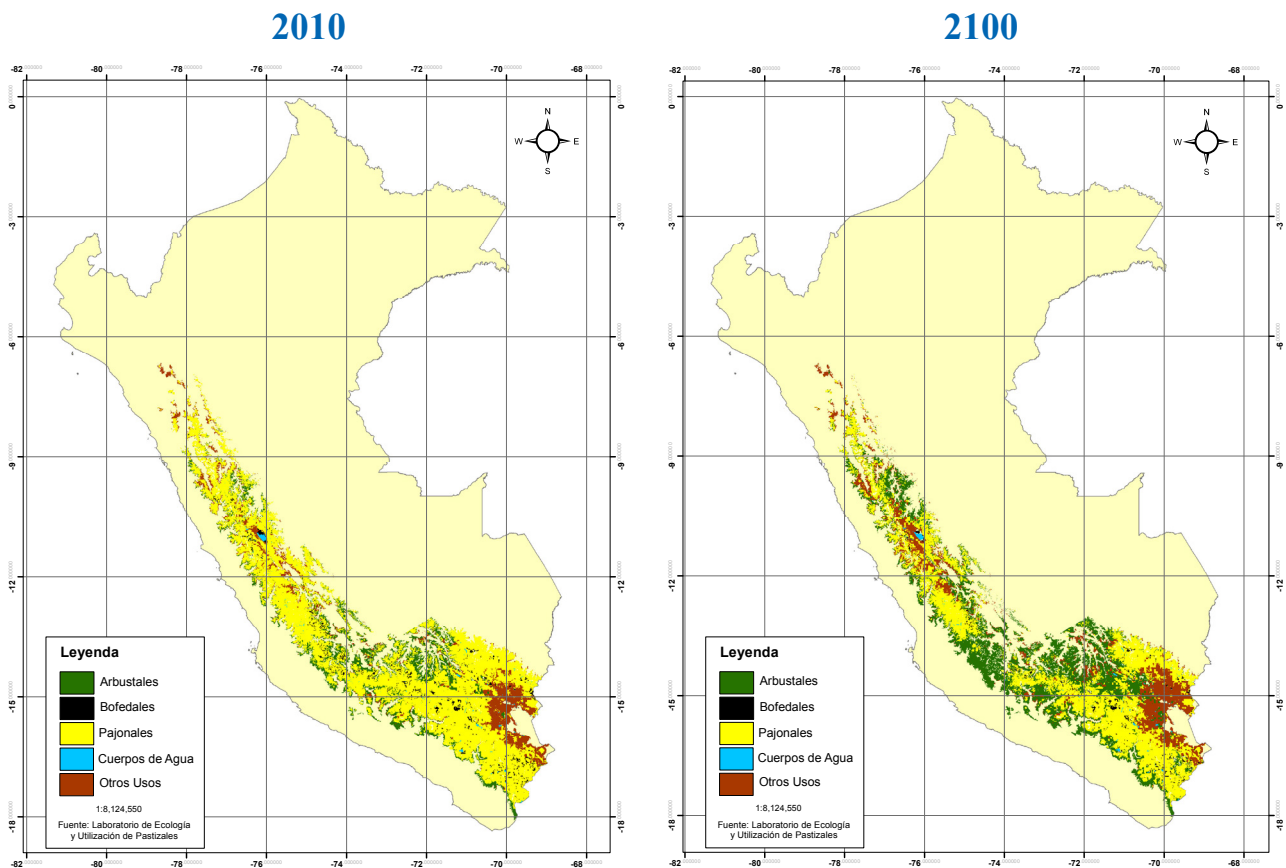


Figura 1. Variación temporal en cobertura vegetal y usos de tierra de la Puna. Fuente: Flores et al. (2014).

Variación de Coberturas

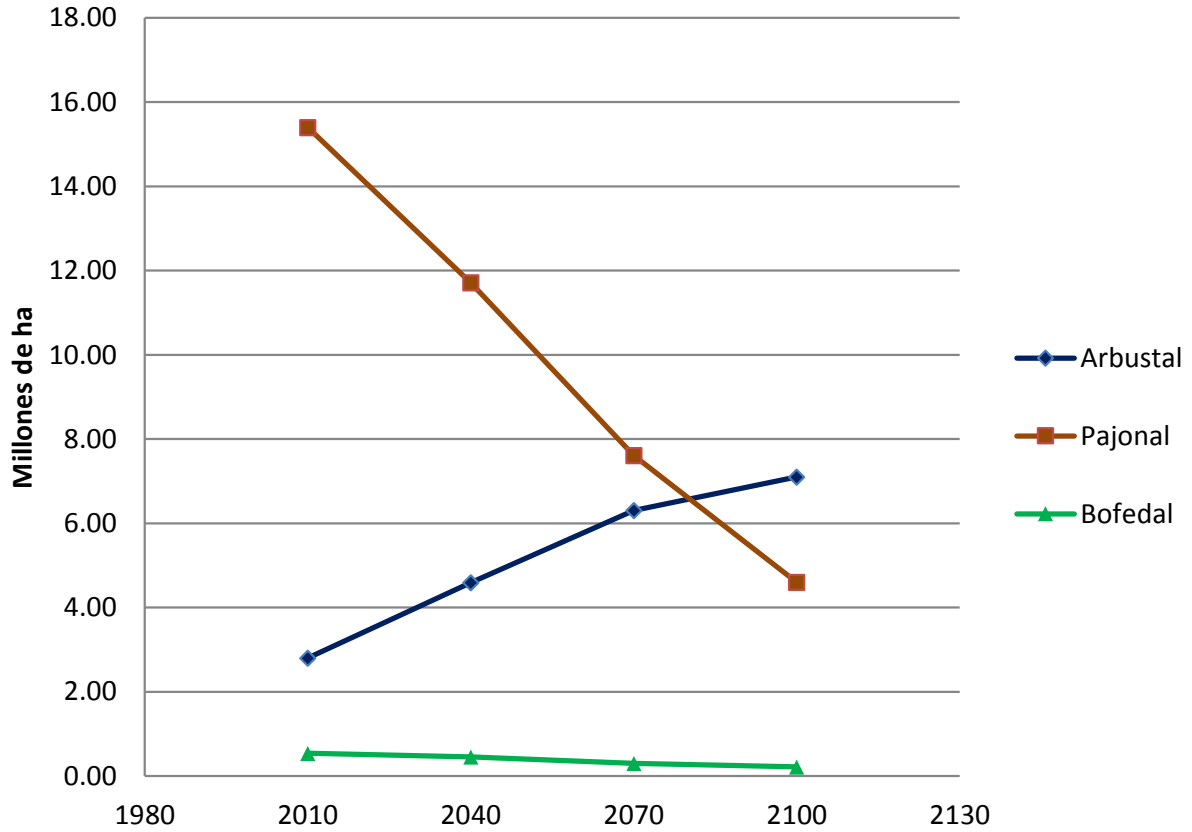


Figura 2. Incremento del nivel de la invasión de arbustos y reducción de pajonales y bofedales en un escenario de emisiones promedio. Fuente: Flores et al. (2014).

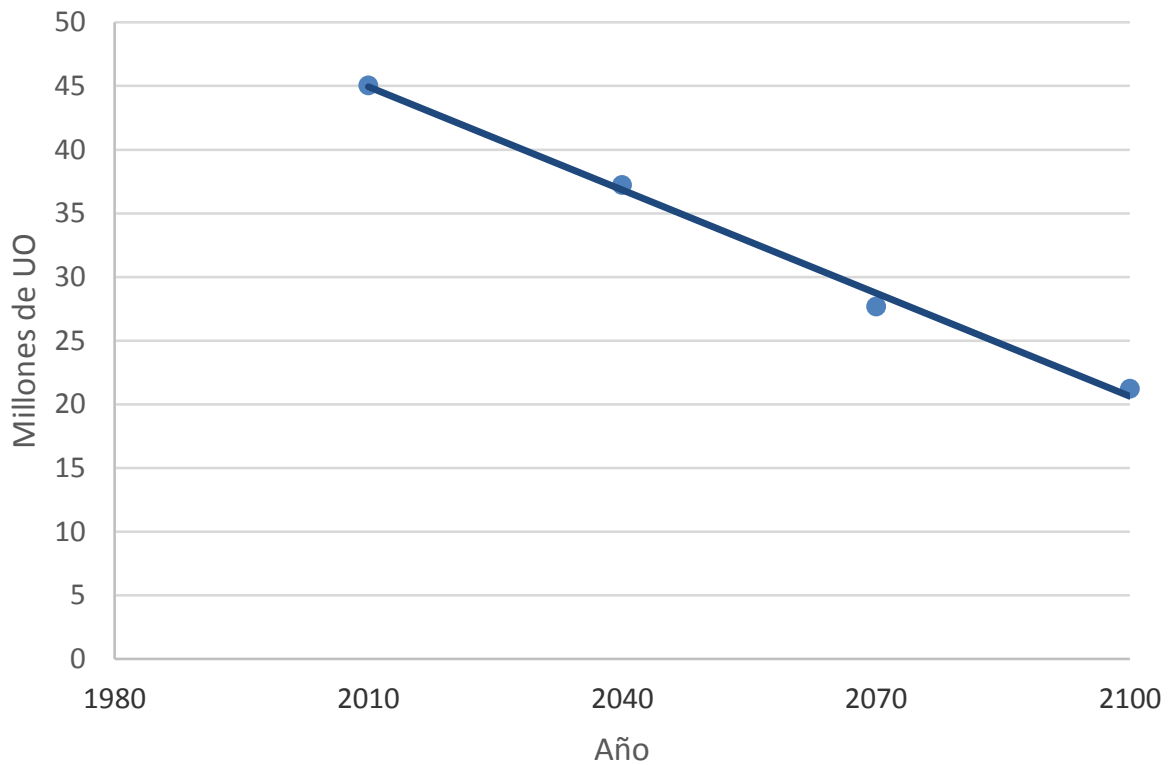


Figura 3. Disminución de la capacidad de carga de los pastizales en un escenario promedio de emisiones. Fuente: Flores et al. (2014).

	Mundiales		Perú	
	MtCO ₂ -eq	%	MtCO ₂ -eq	%
Total	40,700	100.0	120.0	100.0
Sector Agropecuario	5,600	13.8	22.5	18.8
Agricultura	2,700	48.2	12.1	53.8
Ganadería	2,900	51.8	10.4	46.2

Tabla 3. Cantidad y estructura de las emisiones de gases efecto invernadero en el Perú.

Fuente: Flores (2012).

La acumulación de carbono en la atmósfera se puede reducir, disminuyendo las emisiones o bien capturando más carbono. El secuestro del carbono orgánico en el suelo se incrementa cuando se favorece el desarrollo de sistemas de pastoreo como el descanso rotativo y el pastoreo diferido, incrementando la cantidad de biomasa disponible. O también si se implementan prácticas de manejo que mejoren el estatus de conservación, la disponibilidad de agua y el balance de nutrientes en el suelo.

Un ejercicio preliminar revela que si se creasen áreas

de reserva en 10% de tierras cubiertas por pastizales, se redujera la carga animal y se aplicasen prácticas de conservación de suelos en 30% del ecosistema de puna, y se mejoran las capacidades locales para manejar mejor los sistemas de pastoreo en 50% de dicha superficie, se podría incrementar la captura de GEI hasta 8.4 MtC/año, es decir un equivalente al 7% de las emisiones totales y al 37 % del GEI generado por el sector agropecuario, revelando la necesidad de desarrollar políticas e incentivos para mejorar el estado de conservación de los pastizales (Tabla 4).

Estrategias de Mitigación	MtC/ha/año	Perú		
		ha	%	MtC/año*
Creación de áreas de reserva	2.70	1'491,830	10	4.0
Reducir la carga animal	0.42	4'475,490	30	1.9
Conservación de suelos y vegetación	0.29	4'475,490	30	1.3
Mejor manejo del pastoreo	0.20	5'967,320	50	1.2

Tabla 4. Estrategias de mitigación. Fuente: Flores (2012).

* 1 Mt (Megatonelada) = 109 kg

PERCEPCIONES Y DISPOSICIÓN A PAGAR POR LA CONSERVACIÓN DE PASTIZALES

El desarrollo de políticas de conservación y mejora de los recursos naturales requiere la asignación de recursos económicos y el diseño de normas por parte de los decisores políticos, así como el compromiso de los usuarios de las tierras de pastoreo y de la sociedad en su conjunto, para asegurar el suministro adecuado de bienes y servicios ambientales, principal vínculo entre los ecosistemas y la sociedad.

En un estudio reciente, Barrantes y Flores (2013) estimaron el valor de existencia de los pastizales con el Método de Valoración Contingente, preguntándoles a los pobladores cuánto estarían dispuestos a pagar (DAP) por la implementación de un Programa de Conservación y Mejoramiento de Praderas (PCMP) a fin de evitar la degradación de los pastizales y asegurar la continuidad en el suministro de los bienes y servicios que éstos ofrecen. El estudio se realizó en la ciudad de Cerro de Pasco, localizada a 4.300 msnm a través de entrevistas a pobladores locales. Los resultados indicaron que el 99% de los entrevistados consideraban importantes a los pastizales altoandinos y 98.1% consideraron que es necesaria su protección (Tabla 5).

En este estudio se encontró que el 50% de las familias estarían dispuestas a pagar S/. 3.75/mes en el recibo de energía eléctrica para la creación de este fondo para la conservación de pastizales, un ecosistema bajo amenaza, que debería conservarse para que continúe existiendo. Este valor (S/. 3.75/mes) obtenido a partir del modelo PROBIT fue cercano a aquel predicho por el modelo LOGIT (S/. 3.93/mes), cuyas principales variables fueron el ingreso mensual, estado civil, edad y sexo (Tabla 6).

Un análisis sobre principales razones por las cuales el otro 50% de las familias no habría estado dispuesto a pagar indica que fueron los limitados recursos económicos que poseen (55.6%) y porque consideran que deberían ser terceros (minería, gobierno regional y estatal, 37.6%) quienes asuman un rol protagónico en la conservación de estos recursos naturales. A partir de estos datos, fue posible estimar cuánto se podría recaudar como mínimo para constituir un fondo para la implementación del PCMP, utilizando una disposición a pagar ascendente a S/. 1.95/familia/mes. Este valor multiplicado por el número de familias residentes en las provincias de Pasco y Daniel Alcides Carrión, permitió estimar una recaudación mensual de S/. 162,237.38 y una anual de S/. 1'946,848.56 para el PCM (Tabla 6).

N°	Pregunta	Respuesta (%)	
		Si	No
1	¿Acostumbra a realizar actividades al aire libre como paseos, pesca u otros en lugares naturales como bosques, ríos, lagos u otros similares?	96.2	3.8
2	¿Conoce usted los pastizales altoandinos?	64.8	35.2
3	¿Son para usted importante los pastizales altoandinos?	99.0	1.0
4	¿Conoce Ud. de qué se trata un “programa de mejoramiento y conservación de pastizales alto andinos”?	4.8	95.2
5	¿Usted ha visitado los pastizales altoandinos de la región Pasco?	91.4	8.6
6	¿Conoce usted qué es un servicio ambiental?	1.0	99.0
7	¿En su opinión, cree usted que los pastizales alto andinos de la región Pasco están bajo amenaza?	53.3	46.7
8	¿En su opinión, es importante para usted que los pastizales altoandinos deban protegerse?	98.1	1.9

Tabla 5. Resultados de la encuesta cerrada de formato binario. Fuente: Barrantes y Flores (2013).

Variables	Probit	Logit
Disposición a Pagar (S/)	3.6277	3.9378
N° de familias (Pasco y D. A. Carrión)	41,177	41,177
Monto (Millones soles/año)	1.79	1.95

Tabla 6. Disponibilidad a pagar por la existencia de los pastizales. Fuente: Barrantes y Flores (2013).

Alarcón et al. (2014) realizaron un estudio similar a fin de determinar el valor del servicio de regulación del servicio hídrico que suministran los bofedales, utilizando también el Método de Valoración Contingente y preguntaron por la disponibilidad de pago (DAP) de los pobladores de la ciudad de Huaraz para el diseño e implementación de un proyecto de conservación y mejoramiento de este ecosistema. En dicho estudio se entrevistó a 271 ciudadanos. Los resultados indicaron que sólo un 32% de los entrevistados se mostraron dispuestos a colaborar monetariamente con el proyecto de mejora de bofedales y a pagar la tarifa (bid) indicada. Sin embargo, cuando a los entrevistados que no estaban dispuestos a pagar la tarifa inicial se les reiteró la pregunta ¿Cuánto sería el monto máximo que podrían pagar?, el 90% manifestó una DAP de US\$ 1.05/familia/mes, revelando que la Región Ancash podría recaudar anualmente un aproximado de US\$ 312,266 para el desarrollo de programas de conservación y mejora de bofedales, uno de los ecosistemas de montaña que definitivamente será impactado negativamente por el retroceso glaciar.

En un escenario de pago por servicios ambientales los fondos recaudados podrían utilizarse para promover programas de manejo sostenible de praderas y aguadas, diseñar políticas para la conservación y mejora de pastizales, formar capacidades técnicas y ejecutar actividades de monitoreo del estatus ecológico de los pastizales; será necesario, sin embargo, diseñar un marco institucional y legal adecuado para asegurar la sostenibilidad y transparencia del uso del fondo (Barrantes y Flores, 2013).

ESTRATEGIAS Y ACCIONES PARA EL MANEJO SOSTENIBLE

La implementación de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático y lucha contra la degradación de pastizales requiere el compromiso de todos los actores (organizaciones comunales, gobierno local, institutos de investigación, universidades, gobierno nacional y la sociedad) para implementar políticas y acciones orientadas a la conservación de los pastizales y las montañas andinas. Algunas de estas políticas y acciones necesarias se desarrollan a continuación.

Desarrollo de Capacidades

Es necesario realizar acciones orientadas a desarrollar capacidades locales para investigar y manejar racionalmente los pastizales, utilizando estrategias de acción participativa a través de Comités de Investigación Local reconocidos por las asambleas comunales. Asimismo, se debe trabajar con las comunidades pastoriles en la formulación de planes participativos de manejo sostenible que promuevan la resiliencia de los ecosistemas de pastizal y generar conciencia sobre la importancia de los pastizales entre los productores y otros grupos de interés, incorporándolos en la generación de conocimiento y toma de decisiones.

Generación de Conocimientos y Tecnologías

En esta materia se requiere organizar sistemas de base de datos y de conocimiento que permitan guiar la adaptación y transformación de los sistemas ecológicos y sociales. Esto permitirá mejorar el marco conceptual y brindar soporte científico a los modelos ecológicos, con resultados positivos en su prospectiva y el nivel de respuesta. Entre otras acciones, se requiere desarrollar sistemas de monitoreo y alerta temprana orientados a mejorar la capacidad adaptativa de los productores a procesos globales tales como la degradación y el cambio climático.

Institucionalidad y Gobernanza

Es necesario también fortalecer la institucionalidad relevante y los sistemas de gobernanza local, partiendo del desarrollo de una legislación especializada, separada de la

forestal, para el uso, conservación y mejora de los pastizales. Esto se podrá lograr a través de la creación de instituciones que promuevan la asociación entre las organizaciones sociales, científicas, productores, agencias y sponsors, para el aprendizaje social. Lo que debería ser acompañado por el establecimiento de convenios entre los productores y la academia, orientados al estudio y comprensión de los ecosistemas y su respuesta a perturbaciones.

Económico – Ecológicas

En complemento a lo señalado, resulta de importancia el reconocimiento del valor económico de los servicios ambientales que brindan los ecosistemas de pastizal. La promoción del incremento en el valor comercial de los pastizales y la mejora de calidad en los productos, utilizando el etiquetado verde y ecológico, contribuiría también a elevar su valor económico. Para que la sociedad reconozca el valor económico de los pastizales es importante la realización de estudios de valoración económica y su difusión al público general. Todas estas acciones son claves para lograr una mejora significativa en el estado de conservación y la economía de las sociedades pastoriles.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis realizado en este artículo evidencia que el cambio climático definitivamente afectará la contribución de la ganadería a la economía y seguridad alimentaria, debido a su impacto en la composición de la vegetación, en la capacidad de carga, y en el uso de la tierra. Frente a ello, es importante realizar acciones que permitan la adaptación de los ecosistemas de montaña de manera que los impactos sean minimizados para no acrecentar los problemas sociales existentes en el ámbito rural, particularmente la pobreza rural. Ello requiere el diseño de una estrategia de sostenibilidad y seguridad alimentaria, en la cual los roles del estado, gobiernos regionales, y la academia estén claramente definidos y diferenciados. Entre otras medidas, el cambio hacia la crianza de camélidos en los sistemas productivos puede ser una opción adecuada para atenuar los impactos del cambio climático, debido a su menor demanda de agua y sus hábitos alimentarios de incluir arbustos en sus dietas. En este contexto, la creación de mecanismos de Pago por Servicios Ecosistémicos podría, bajo un marco legal e institucional adecuado, permitir generar recursos financieros que puedan ser destinados a atenuar las emisiones de GEI, la pérdida de potencial productivo, y mejorar la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Melody Zarria y William Postigo, Investigadores Asociados al Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales, por sus valiosos aportes que han permitido generar este documento.

REFERENCIAS

- Alarcón, J. A., Flores, E. R. y Barrantes, C. A. (2014). *Valoración económica para la mejora de los ecosistemas de bofedales del entorno de la ciudad de Huaraz*. Notas Técnicas sobre Cambio Climático. Huaraz, Ministerio del Ambiente.
- Barrantes, C. A. y Flores, E. R. (2013). Estimando la disposición a pagar por la conservación de los pastizales alto andinos. *Ecología Aplicada*, 12(2), 91-97.
- Belgacem, A. O. y Louhaichi, M. (2013). The vulnerability of native rangeland plant species to global climate change in the West Asia and North African regions. *Climatic Change*, 119(2), 451-463.
- Brown, J. y Macleod, N. (2011). A site-based approach to delivering rangeland ecosystem services. *The Rangeland Journal*, 33(2), 99-108.
- Flores, E. R., Cruz, J. y López, M. (2007). Management of sheep genetic resources in the Central Andes of Peru. En Tempelman, K. y Cardellino, R. (Eds.). *People and animals. Traditional livestock keepers: Guardians of domestic animal diversity*, pp. 47-58. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Flores, E. R. (2012). Pastores de puna, cambio climático y seguridad alimentaria. Trabajo presentado al Seminario Internacional “Seguridad Alimentaria y Economía del Cambio Climático”. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Flores, E. R., Ñaupari, J. A. y Tácuna, R. E. (2014). La economía del cambio climático en el Perú: Ganadería altoandina. En Ludeña, C. E., Sánchez-Aragón, L., de Miguel, C., Martínez, K. y Pereira, M. (Eds.). *La economía del cambio climático en el Perú*. Lima, Banco Interamericano de Desarrollo / Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Huerta, L. G. y Flores, E. R. (2002). Formulación de herramientas de gestión integral para el manejo sostenible de las praderas altoandinas: Estudio de caso en la cabecera de microcuenca Quitaracza – cuenca Santa, Sihuas – Ancash. Informe Interno. Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales. Lima, Universidad Agraria La Molina.
- Kassahun, A., Snyman, H. A. y Smit, G. N. (2008). Impact of rangeland degradation on the pastoral production systems, livelihoods and perceptions of the Somali pastoralists in Eastern Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 72(7), 1265-1281.
- Lau, A. (2010). *Evaluación económica ambiental de un plan de manejo y gestión de la granja comercial de la C. C. Huantán Lima* (Tesis de Ingeniero Zootecnista). Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Martínez, A., Núñez, E., Silva, Y., Takahashi, K., Trasmonte, G., Mosquera, K. y Lagos, P. (2006). Vulnerability and adaptation to climate change in the Peruvian Central Andes: Results of a pilot study. En *Proceedings of the 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO)*, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, pp. 297-305. São José dos Campos, INPE.

- McCarthy, J. J. (Ed.). (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press.
- Nieto, M. I., Guzmán, M. L. y Steinaker, D. (2014). Emisiones de gases de efecto invernadero: Simulación de un sistema ganadero de carne típico de la región central Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 40(1), 92-101.
- Rasul, G. y Hussain, A. (2015). Sustainable food security in the mountains of Pakistan: Towards a policy framework. *Ecology of Food and Nutrition*, 54(6), 625-643.
- Segura, J. L., Montes, C., Hilario, M., Asenjo, P. y Baltazar, G. (2002). *Pobreza y desnutrición infantil*. Lima, PRISMA ONGD.
- Thornton, P. K., van de Steeg, J., Notenbaert, A. y Herrero, M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, 101(3), 113-127.
- Thuiller, W. (2007). Biodiversity: climate change and the ecologist. *Nature*, 448(7153), 550-552.
- Vuille, M. (2013). *Climate change and water resources in the tropical Andes*. IDB Technical Note 515. Inter-American Development Bank.
- Zarria, M. R. y Flores, E. R. (2015). Potencial de mejora de los pastizales de los sistemas de producción de alpacas de la Sierra Central. En *Libro de Resúmenes. VII Congreso Mundial de Camélidos Sudamericanos*, p. 46. Puno, Perú, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

MAPEO DE BOFEDALES EN CABECERAS DE CUENCA MEDIANTE IMÁGENES DE LOS SATÉLITES LANDSAT

Mapping Peatlands in Basin Headwaters Using Landsat Satellite Images

Jorge L. Garcia D.¹ (jlgd01@hotmail.com / jorge.garcia@unmsm.edu.pe)

Bram L. Willems^{1,2} (bwillems@unmsm.edu.pe / bwillems@cca.org.pe)

Raúl Espinoza V.^{1,2} (respinozavillar@gmail.com)

¹Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ap. Postal 14-0149, Lima 14, Perú

²Centro de Competencias del Agua, Av. La Molina S/N, La Molina, Lima 12, Perú

RESUMEN

Se diseñó una metodología para identificar y cuantificar la extensión de los bofedales de puna de la cabecera de cuenca del río Chillón, ubicados sobre los 3800 msnm y se eligió un bofedal piloto. Se procesó información de los sensores Landsat TM, ETM+ y OLI de los años 1986 al 2015, una imagen por año. Las imágenes correspondían a la fecha más próxima posible de la misma estación del año. Se generaron mapas de distribución espacial de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y Diferencia Normalizada Índice de Infrarrojos (NDII). Estos índices fueron visualizados en las bandas de Rojo, Verde y Azul (RGB) de la siguiente manera: R (NDII), G (NDVI), B (NDWI). Posteriormente, para zonificar los bofedales, se realizó una clasificación por paralelepípedos sobre esta visualización en RGB. También se utilizó un mapa de pendientes, y con él se generó el mapa de distribución espacial de bofedales, también se obtuvo el vector de bofedales.

Palabras clave: *Bofedales, Landsat, Chillón, NDVI, NDII*

ABSTRACT

A methodology has been designed to identify and quantify the extent of peatlands in the headwaters of the Chillón river basin, located at 3800 masl, where a pilot area was defined. Information from Landsat TM, ETM+ and OLI sensors from 1986 to 2015 was processed using one image per year. The images corresponded as close as possible to the same date in the same season. Spatial distribution maps were produced using the normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference water index (NDWI) and normalized difference infrared index (NDII). These indexes were displayed in the Red, Green, and Blue (RGB) bands as follows: R (NDII), G (NDVI), B (NDWI). Zonification of the peatlands was performed by means of a classification of parallelepipeds

on the RGB display. A slope map was used to generate the map of spatial distribution of the peatlands, and the peatlands vector was also obtained.

Keywords: *Peatlands, Landsat, Chillón, NDVI, NDII*

INTRODUCCIÓN

La zona metropolitana de Lima es la segunda ciudad más grande del mundo ubicada en un desierto, la escasez de agua es una de las principales condicionantes ambientales que ha acompañado el crecimiento de la ciudad. La ciudad de Lima no tiene grandes ríos ni reservas de agua. En Lima, se asienta cerca de 30% de la población de todo el país, que se abastece de agua utilizando el recurso hídrico de tres cuencas, de los ríos Rímac, Chillón y Lurín. Los estudios programados en esta investigación se orientaron a crear una metodología para identificar y cuantificar humedales o bofedales de puna de la cabecera de cuenca del río Chillón.

Los humedales son ecosistemas importantes de gran interés, ellos almacenan agua y la emanan lentamente recargando aguas subterráneas, mejorando su calidad, actuando como filtros naturales al absorber su contaminación y proporcionando un gran número de hábitat para la fauna y vegetación, incluyendo a muchas especies amenazadas o en peligro (De Steven y Toner, 2004; Lagos et al., 2008). Según la Convención Ramsar (www.ramsar.org) se consideran humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, naturales o artificiales, permanentes o temporales, estancadas o corrientes dulces, salobres o salados, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Art.1 Convenio Ramsar, www.ramsar.org), y en otros alterando la lámina de agua y sus riberas inmediatas (Pérez y García, 2004).

Los bofedales son considerados como humedales de altura, es un sistema frágil, por lo tanto, puede ser fácilmente alterado si no es preservado de manera sostenible (Flores, 2002). A pesar de su limitada extensión, los bofedales son ecosistemas estratégicos de reserva y sostenibilidad

del ciclo hidrológico. En consecuencia, requieren ser manejados mediante una estrategia de uso sostenible, considerando que son especialmente vulnerables al cambio climático, las sequías prolongadas y la intervención humana (Salvador, Monerris y Rochefort, 2014). Según el Ministerio de Ambiente del Perú (MINAM, 2015), los bofedales constituyen un ecosistema hidromórfico distribuido en la región altoandina, a partir de los 3800 msnm. Ocupan una superficie de 544,562 ha que representa el 0.42% del total nacional. El bofedal presenta vegetación natural siempre verde, de elevado potencial forrajero y con suelo permanentemente húmedo apto para el pastoreo, principalmente de alpacas, constituyéndose este tipo de ecosistema en un campo natural de pastoreo (Prieto et al., 2001).

OBJETIVO GENERAL

Establecer una metodología que permita identificar y cuantificar la extensión de los humedales y bofedales de puna, situados en la cabecera de cuenca del río Chillón; se trata además de replicar esta metodología a otros departamentos del Perú, mediante datos imágenes de los sensores TM, ETM+ OLI a bordo de los satélites Landsat.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar una zona de validación de bofedales y elegir un bofedal piloto.
- Determinar las características fisicoquímicas de los bofedales de la cuenca del río Chillón.
- Obtener imágenes de los sensores TM, ETM+ OLI de la escena que incluya la cabecera de cuenca del río Chillón, así completar una serie de 30 años, desde 1986 al 2015.
- Establecer la distribución espacial del NDVI, NDWI, NDII y NDDI de la cabecera de cuenca del río Chillón.
- Generar vectores de bofedales y establecer la distribución espacial del NDVI, NDWI y NDII solo de bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón para el periodo de estudio.
- Cuantificar la variación de las áreas de bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón para el periodo de estudio.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Chillón se encuentra ubicada en las provincias de Lima y Canta, en el departamento de Lima (Figura 1) al Norte de la Ciudad de Lima. Geográficamente, se encuentra entre las coordenadas E 76° 21' 55" a 77° 10' 49" W y N 11° 18' 23" a 12° 00' 00" S. La cuenca del río Chillón es integrante de la vertiente del Pacífico. El río Chillón nace en un conjunto de lagunas: Pucracocha, Aguascocha y Chuchón, sobre los 4,800 msnm y desciende

hasta el nivel del mar en un recorrido de 126 kilómetros, cuando desemboca en el océano Pacífico (Olarte, 2002). Los recursos hídricos, la flora y la fauna de la cuenca del río Chillón permiten el sostenimiento de la provincia de Canta y parte de la provincia de Lima, 15 distritos y decenas de comunidades campesinas (Suarez, 2012). La cuenca del río Chillón tiene una extensión aproximada de 2,444 km², de la cual el 42% responde a la denominada "cuenca húmeda", llamada así por encontrarse por encima de la cota de los 2,500 msnm, límite inferior fijado al área que se estima contribuye efectivamente al escurrimiento superficial (Amiel, 1964).

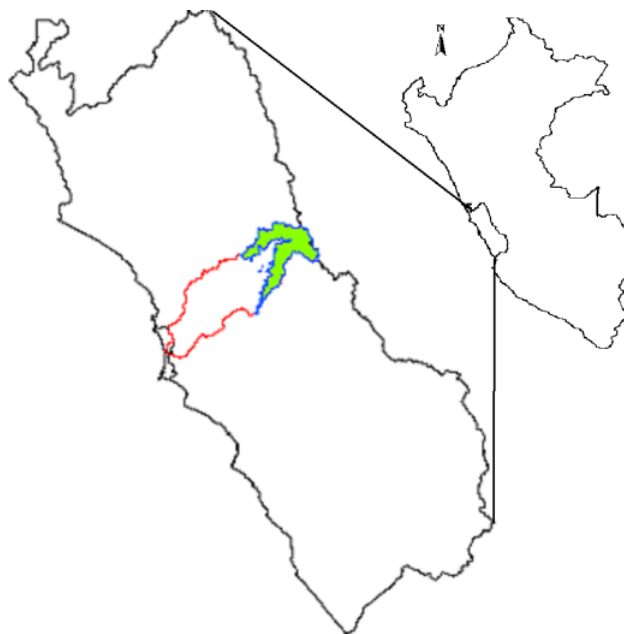


Figura 1. Área de estudio, cabecera de cuenca del río Chillón (en verde).

Su sistema fluvial está formado por los ríos Chillón y Quisquichaca, y presenta un área de drenaje de 2,444 km². El 42% de dicha área, es decir 1,039 km², corresponde a la cuenca húmeda que está sobre la cota 2,500 msnm, que es el límite inferior del área que contribuye efectivamente al escurrimiento superficial. La cuenca presenta una forma alargada de 126 km de largo con un ancho variable de 15 a 30 km; las subcuencas son parcialmente reguladas por lagunas ubicadas en las cabeceras de las mismas.

La cuenca del río Chillón limita por el norte con las cuencas de Chancay – Huaral, por el sur con la cuenca del Rímac, por el este con la cuenca del Mantaro y por el oeste con el Océano Pacífico. En términos de demarcación política cubre la provincia de Canta y los distritos de Carabayllo, Puente Piedra, Ventanilla, parte de Comas, Los Olivos y San Martín de Porras, integrados a la provincia de Lima.

BOFEDAL PILOTO

Se realizaron varios trabajos de campo (Figura 2) con el objetivo de observar, in situ, las características de los bofedales y elegir un bofedal piloto. Se desarrollaron varios trabajos de campo para elegir un bofedal piloto con las siguientes características: que esté conservado y con poca presencia de influencia antrópica. Los trabajos de campo



Figura 2. Trabajo de campo, la imagen I corresponde al lugar del bofedal piloto y sus alrededores, la imagen A corresponde al bofedal menor, las imágenes B y C corresponden el recorrido hasta llegar al bofedal piloto Chunal, la imagen D es el bofedal piloto Chunal, la imagen E corresponde a la toma de puntos GPS dentro del bofedal Chunal, las imágenes F y G corresponden a bofedales que se encontraban cerca del bofedal Chunal. La imagen II corresponde a los puntos GPS tomados en los trabajos de campo.

se desarrollaron en la cabecera de cuenca del río Chillón, a unas 5 horas de la ciudad de Lima. Se inspeccionaron dos zonas de trabajo, la primera en un bofedal ubicado en las coordenadas lat: $-11^{\circ} 21' 4.93''$, lon: $-76^{\circ} 27' 42.73''$, a una altura de 4,270 msnm, al cual denominaremos bofedal menor. Se observó que dicho bofedal es alimentado por un segundo bofedal al cual denominaremos bofedal piloto "Chunal", el que se encuentra ubicado más al norte y a más altura en las coordenadas lat: $-11^{\circ} 21' 39.60''$, lon: $-76^{\circ} 27' 30.73''$, a una altura de 4,400 msnm con una superficie aproximada de 16 ha. En el primer bofedal, se registraron 16 puntos GPS, luego se tomaron 10 puntos GPS, que comprendieron el recorrido desde el primer bofedal hacia el bofedal Chunal, y se registraron 28 puntos GPS en el contorno y al interior del bofedal piloto Chunal. Se eligió el bofedal Chunal como bofedal piloto, ya que este está ubicado en un lugar poco accesible, además en él la presencia antrópica era mínima.

METODOLOGÍA

Se realizó un trabajo de gabinete para elegir varios bofedales y en particular un bofedal piloto en la cuenca alta del río Chillón. Dicha elección se realizará a través del programa informático Google Earth, que es de libre descarga, que permite visualizar múltiple cartografía, basada en la fotografía satelital. Seguidamente se realizaron los trabajos de campo para corroborar si en la elección de gabinete nuestros bofedales eran realmente bofedales, en los trabajos de campo visualizamos las características de los bofedales y calculamos la pendiente que tiene el bofedal piloto. También observamos que a través de las imágenes obtenidas del programa Google Earth se puede identificar los bofedales.

Una vez obtenido el bofedal piloto se procedió a la descarga de imágenes correspondientes a esa zona de estudio. Se descargó un Modelo Digital de Elevaciones

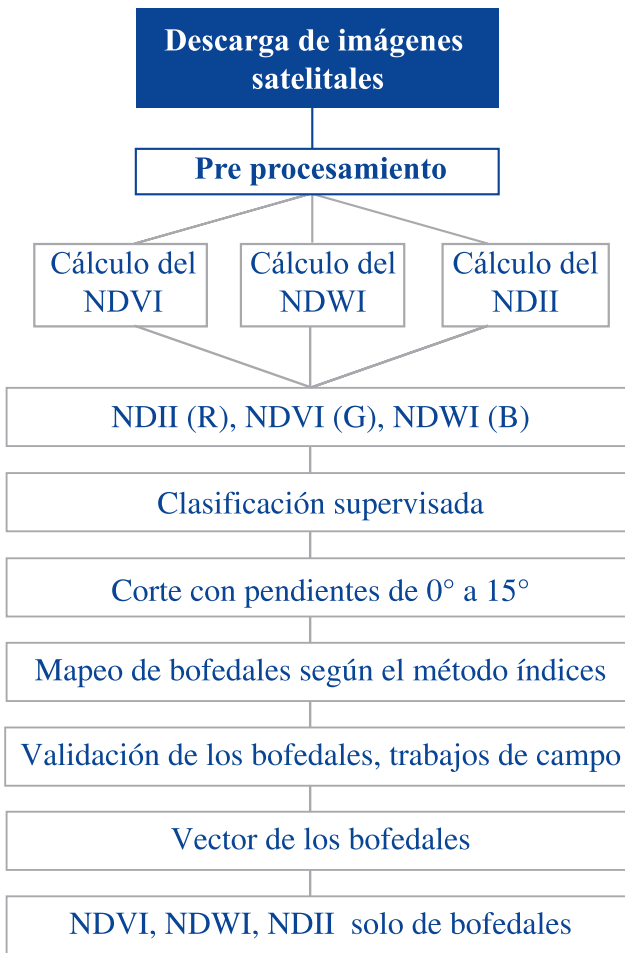


Figura 3. Diagrama de la metodología empleada para el mapeo de bofedales.

(DEM) de la zona de estudio. Con la ayuda del DEM y con un vector de la cuenca de río Chillón, se cortó la escena de la imagen descargada para trabajar con las zonas de la cuenca con alturas desde los 3,800 msnm. Posteriormente se realizó el preprocesamiento de imágenes mediante el software Environment for Visualizing Images (ENVI).

Se descargaron 30 imágenes correspondientes a la escena Path 7, Row 78, una por año, de 1986 al 2015. A continuación, se muestran los resultados de preprocesamiento y mapas de la imagen de fecha 5/07/2014. La cuenca del río Chillón se encuentra dentro de escena (LC80070682014186LGN00).

Se generaron mapas de distribución espacial de los índices NDVI, NDWI, NDII, para luego visualizarlos en las bandas RGB, la siguiente forma R, G, B (rojo, verde y azul respectivamente), la visualización en RGB zonifica los bofedales. Posteriormente, se realizó una clasificación supervisada de los mapas RGB en el software ENVI, luego se propuso un factor de confiabilidad de la clasificación, y se usó el paralelepípedo que clasificó la clase de bofedal. Posteriormente, se generó un mapa de 0 a 150, que se utilizó para cortar el mapa de clasificación y así obtener un mapa de clasificación con pendientes de 0 a 150, seguidamente se realizó un vector de bofedales y con este vector se generaron mapas de distribución espacial de los índices NDVI, NDWI, NDII sólo de bofedales. Este mismo procedimiento se realizó para las 30 imágenes desde 1986 al 2015. Un esquema de esta metodología se muestra en la Figura 3.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

PARAMETROS FÍSICOS DEL BOFEDAL EN EL AREA DE ESTUDIO

Durante los trabajos de campo se tomaron medidas a puntos que formaban líneas paralelas entre sí, en total fueron medidos 16 puntos una profundidad de 15 cm, según lo ilustra la Figura 4A. También, se midieron los parámetros físicos, temperatura, conductividad eléctrica y el contenido volumétrico de agua en el bofedal (Figura 4B).

Los resultados de las mediciones obtenidas de la temperatura, T, conductividad eléctrica, EC, contenido volumétrico de agua, VWC, en el suelo del bofedal se muestran en la Tabla 1, en ella también se aprecia las coordenadas de cada punto, así como la altura a la que se encuentran.



Figura 4. A) Se muestra los puntos en donde fueron medidos los parámetros de temperatura, conductividad eléctrica y el contenido volumétrico de agua en el suelo (humedad). B) Se muestra en detalle cómo fue medido cada punto con el equipo multiparámetro, a una profundidad de 15 cm.

De los datos de la Tabla 1 podemos observar que los suelos del bofedal tuvieron en ese momento, una temperatura promedio, T, de 12.4 °C, el valor promedio de la EC fue

de 0.2 ds/m, que nos indica que el suelo del bofedal no es salino según la clasificación indicada, además presentan mucha concentración de agua ya que VWC fue de 0.46.

Lat	Lon	Altura [m]	vwc [m ³ /m ³]	T [°C]	EC [ds/m]
350521	8742859	4233	0.45	15.3	0.2
340488	8742880	4237	0.56	13.9	0.3
340463	8742898	4244	0.41	12.0	0.2
340468	8742930	4242	0.39	12.5	0.2
340497	8742929	4242	0.57	11.8	0.3
340523	8742911	4242	0.52	13.2	0.3
340549	8742899	4239	0.52	13.3	0.1
340555	8742927	4239	0.49	12.9	0.3
340533	8742938	4238	0.53	12.4	0.3
340547	8742971	4241	0.47	12.2	0.2
340566	8742959	4225	0.34	12.3	0.2
340584	8742990	4249	0.34	12.8	0.2
340558	8743010	4248	0.29	15.5	0.1
340562	8743095	4257	0.55	11.5	0.3
340526	8743025	4246	0.46	9.0	0.3
340511	8742987	4245	0.50	8.6	0.3
VALORES PROMEDIO			0.46	12.4	0.2

Tabla 1. Se muestran las mediciones de todos los puntos, así como también sus coordenadas y la altura.

MUESTRAS DE SUELO DEL BOFEDAL PILOTO

Se recolectaron muestras del suelo del bofedal piloto Chunal para hacer una caracterización referencial de

algunas propiedades físicas químicas de sus suelos, se recolectaron cinco muestras, cuatro de ellas estaban dentro del bofedal y la quinta muestra se encuentra fuera, según se ve en la Figura 5. En la Tabla 2 se dan las características de los puntos correspondientes a las muestras.

Muestra	Coordenadas Lat Lon	Altura msnm	Característica
M I	340811 8743811	4405	Muestra en borde del bofedal
M II	340791 8743503	4402	Muestra en la salida del bofedal
M III	340767 8743534	4402	Muestra en la salida de agua del bofedal
M IV	340961 8743758	4406	Muestra en la parte central del bofedal
M 5	340971 8743642	4416	Muestra fuera del bofedal a 130 m de M IV

Tabla 2. Recolección de muestras de suelo tomadas en el bofedal piloto Chunal.

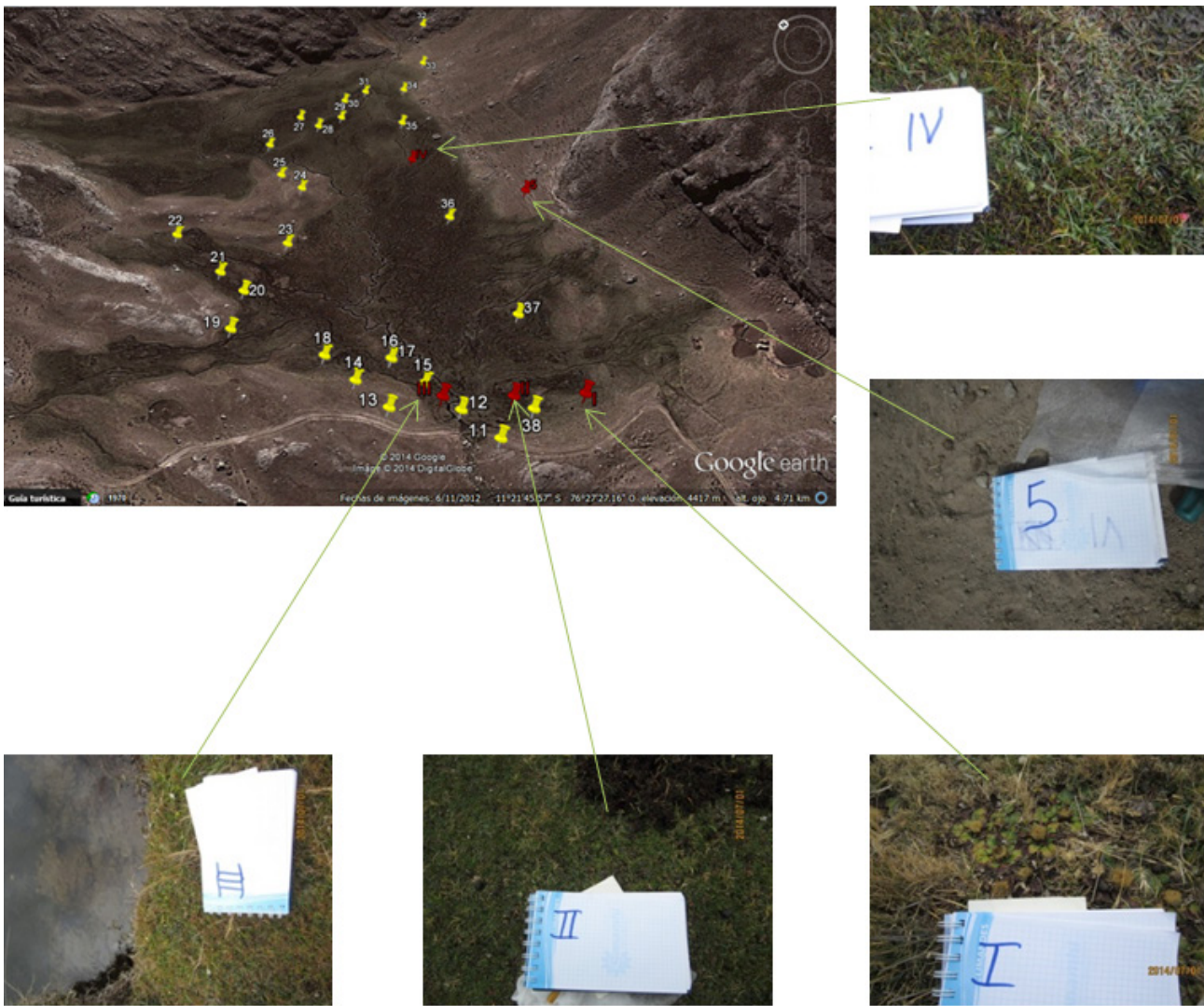


Figura 5. Muestras de suelos recolectadas.

CÁLCULO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH) DEL SUELO DEL BOFEDAL

Para las muestras de suelos se obtuvo un promedio de las lecturas, tanto de pH como de temperatura. Los resultados se muestran en la Tabla 3. En la Figura 6, se hace un esquema simplificado del procedimiento experimental.

Muestra	pH	Temperatura	Condición
M I	4.7	19.8	FUERTEMENTE ACIDA
M II	5.86	19.8	ACIDA
M III	6.51	19.8	LIGERAMENTE ACIDA
M IV	6.35	19.8	ACIDA
M 5	5.72	19.8	ACIDA

Tabla 3. Resultados de las medidas del pH del suelo del bofedal.

Para los suelos de los bofedales reportan un pH de 4.8 (Lafuente et al., 1988), también se reporta para un suelo de bofedal un pH entre 7.72 y 6.95 (Sotomayor, Canahua y Vargas, 1990) resultado que es comparable con los obtenidos en este trabajo.

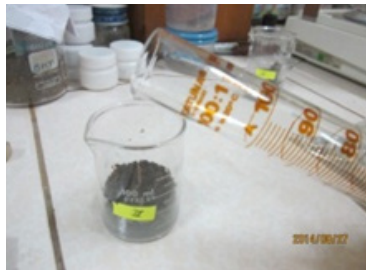
6A. Medida de la muestra 20 g.



6B. Medida del agua desmineralizada 20 ml.



6C. Agua desmineralizada en la muestra.



6D. Agita la solución con una bagueta por un minuto.



6E. Buffer de calibración.



6F. Calibración del equipo.



6G. Medida del pH.



Figura 6. Se muestra el procedimiento seguido para el cálculo del pH de los suelos del bofedal piloto Chunal. En la imagen A se observa la media de la cantidad de 20 g, en B la medida de 20 ml del agua desmineralizada, C y D el procedimiento de agitación para formar la solución, en las imágenes E y F se muestra el procedimiento de calibración del potenciómetro y en la imagen G el cálculo del pH.

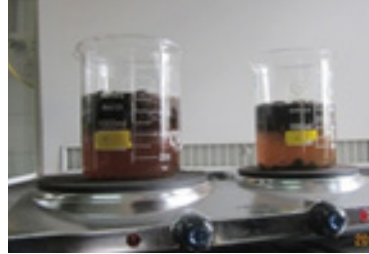
ELIMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DE LAS MUESTRAS

En la Figura 7, se muestra un esquema simplificado de la eliminación de materia orgánica presente en el suelo del bofedal.

7A. El procedimiento se realizó en una cabina extractora de gases.



7B. Muestra, agua desmineralizada y peróxido de hidrógeno en una estufa al inicio.



7C. Muestra, agua desmineralizada y peróxido de hidrógeno en una estufa luego de 12 horas.



7D. Lavado de la muestra para eliminar el peróxido de hidrógeno presente en la muestra.



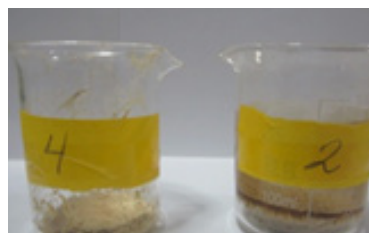
7E. Filtrado de la muestra ya lavada.



7F. Secado de la muestra en el horno a una temperatura de 60°C.



7G. Secado de la muestra en el horno durante los cuatro días.



7H. Muestra libre de materia orgánica.

Figura 7. Esquema simplificado para la eliminación de materia orgánica.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA EN POLVO PARA EL ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Para someter a las muestras de suelos al análisis de DRX fue necesario obtener la muestra en polvo (Figura 8).



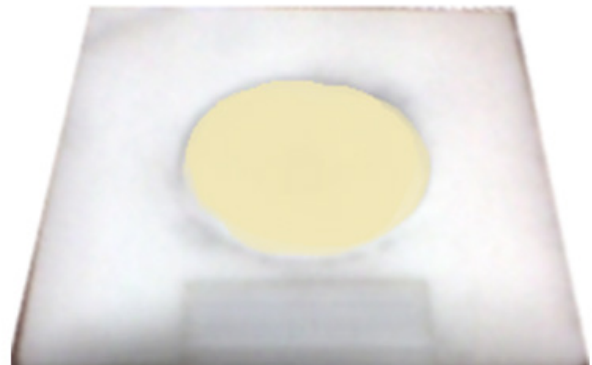
A. Mortero de ágata y muestra, al inicio.



B. Proceso de molienda de la muestra.



C. Muestra en polvo.



D. Portamuestra para la DRX.

Figura 8. Preparación de la muestra en polvo para el análisis de DRX.

MUESTRA EN EL EQUIPO DE DRX

Seguidamente se inició la caracterización estructural mineralógica, se utilizó la técnica de DRX. Los datos se obtuvieron de 5° a 70° (a 0.02 x 0.2 s) mediante un difractómetro universal de muestras de la firma Bruker, con D8 focales, usando la radiación $K\alpha_1$ del Cu (1.5406Å) y en geometría Bragg – Brentano (Figura 9).

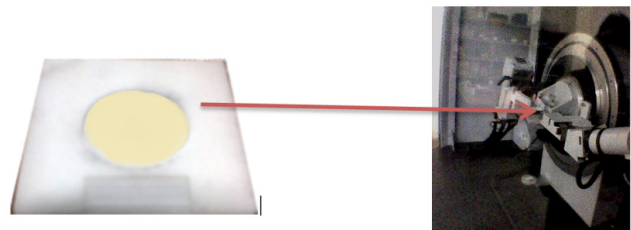


Figura 9. Equipo de DRX analizando la muestra.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DRX

En la Figura 10, se muestra la DRX de todas las muestras (I, II, IV y 5), en ella se observa, de forma general, que

todas las muestras picos corresponden principalmente a: albite, línea azul; quartz línea roja. Cabe resaltar que existen picos en menor proporción que no han sido identificados, ya que no es un objetivo relevante de este trabajo.

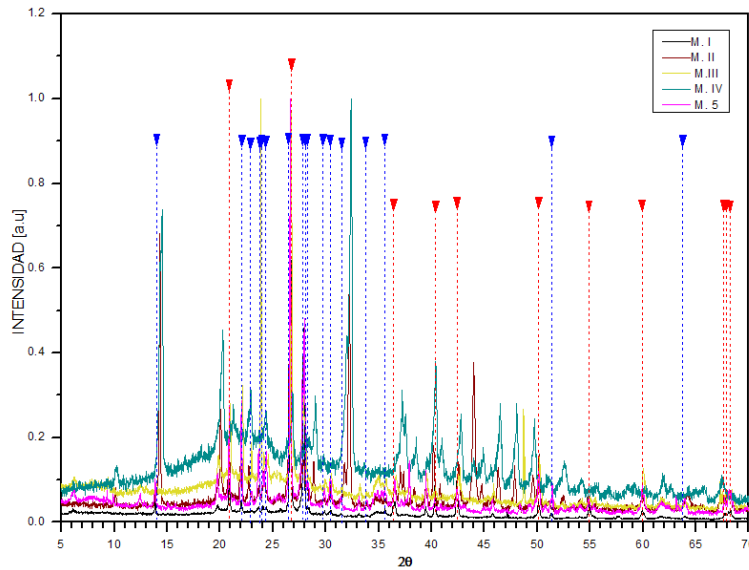


Figura 10. DRX de todas las muestras.

MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL NDVI, NDWI, NDII

Realizado el reprocesamiento y la corrección atmosférica de la imagen (fecha 05/07/14) con el modelo Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH), se generó el mapa de distribución espacial del NDVI, NDWI y el NDII de cabecera de cuenca del río Chillón. Para visualizarla, se usó una paleta de colores

que resaltaba los bofedales en color verde oscuro, azul y marrón, respectivamente.

En la Figura 11A, se observa el mapa de distribución espacial de NDVI, apreciamos zonas de color negro, rangos negativos, que corresponde a cuerpos de agua o a nevados. En la Figura 11B, se muestra la distribución espacial de NDVI del bofedal piloto “Chunal” encerrado en círculo. Los rangos de distribución del NDVI que se obtuvieron para el bofedal piloto están entre los 0.44 a 0.831.

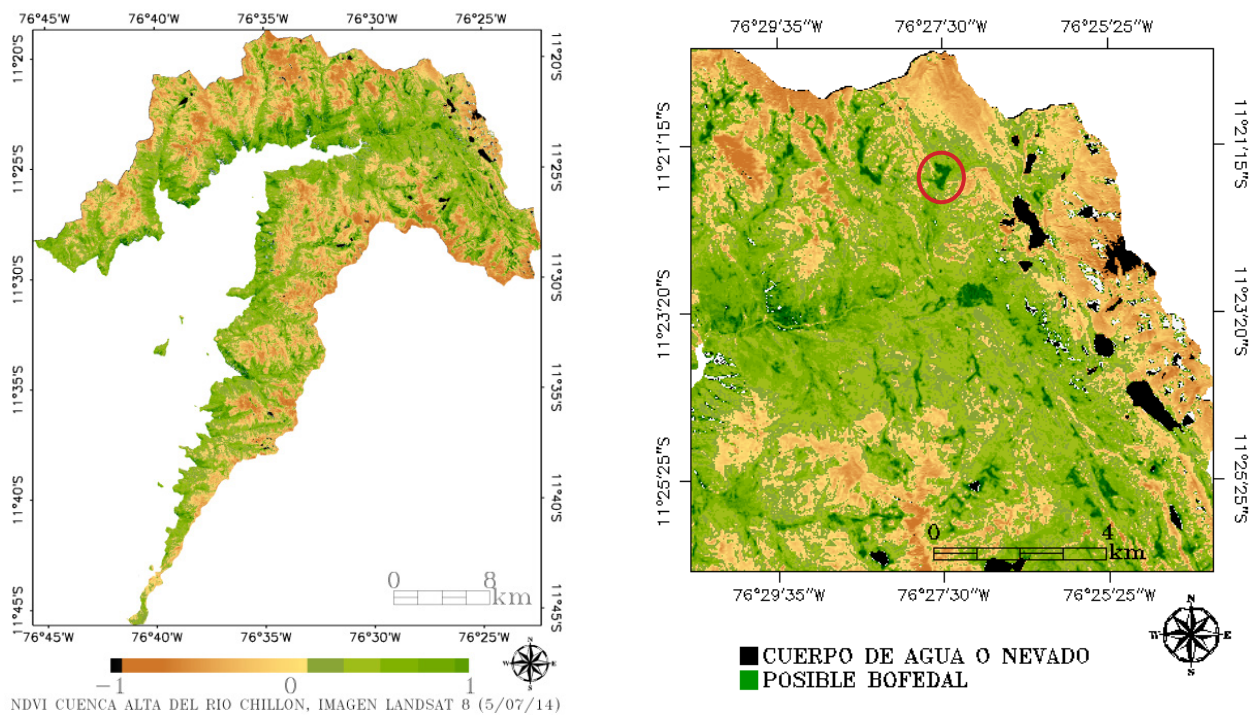


Figura 11. A) Distribución espacial de NDVI de la cabecera de cuenca del río Chillón. B) Distribución espacial del NDVI en la zona de estudio.

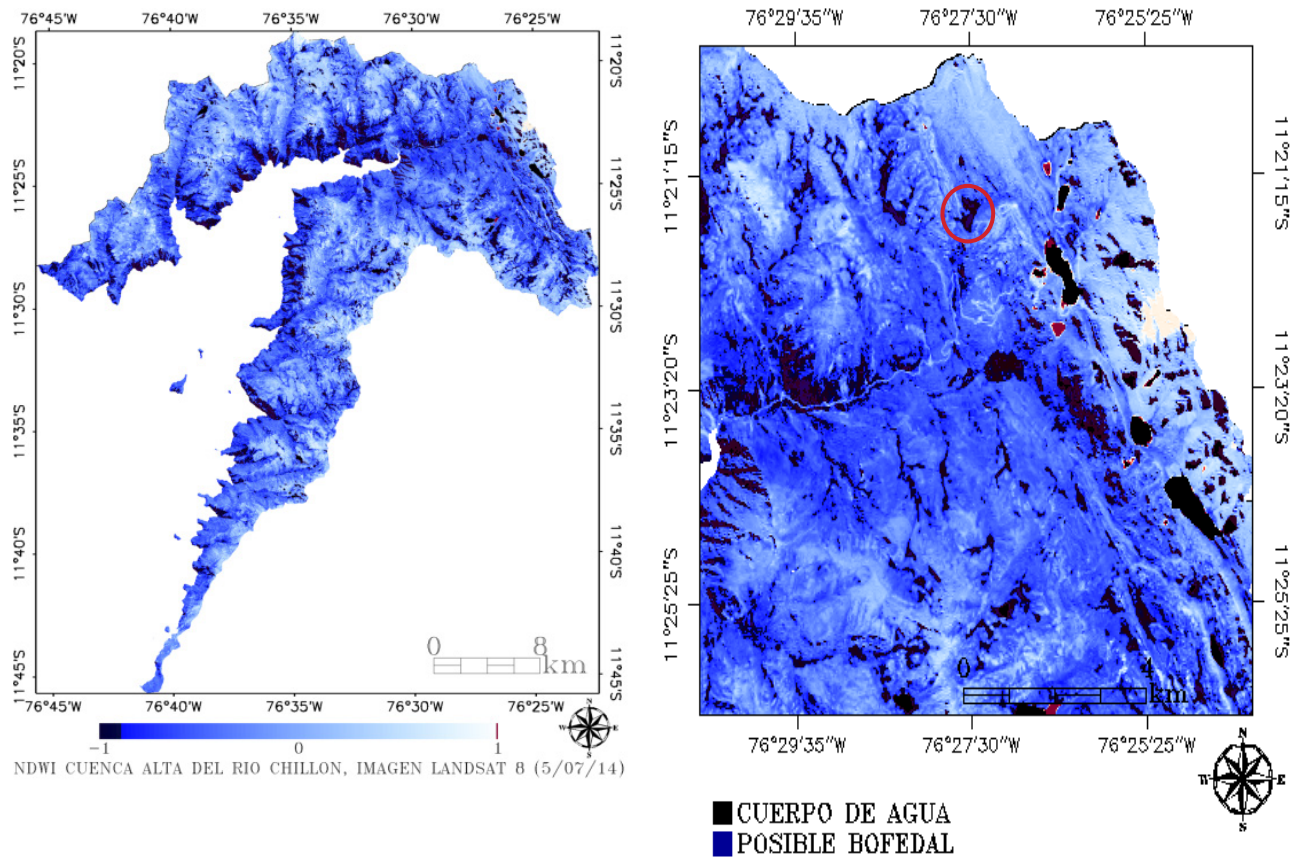


Figura 12. A) Distribución espacial del NDWI de la cabecera de cuenca del río Chillón.
 B) Distribución espacial del NDWI de la zona de estudio.

En la Figura 12A, se tiene el mapa de distribución espacial de NDWI en la cabecera de cuenca de río Chillón, observamos que el color negro corresponde a cuerpos de agua. La Figura 12B muestra la distribución espacial de

NDWI del bofedal piloto Chunal, encerrada en círculo. Los rangos de distribución del NDWI que se obtuvieron para el bofedal piloto están entre los -0.850 a -0.512.

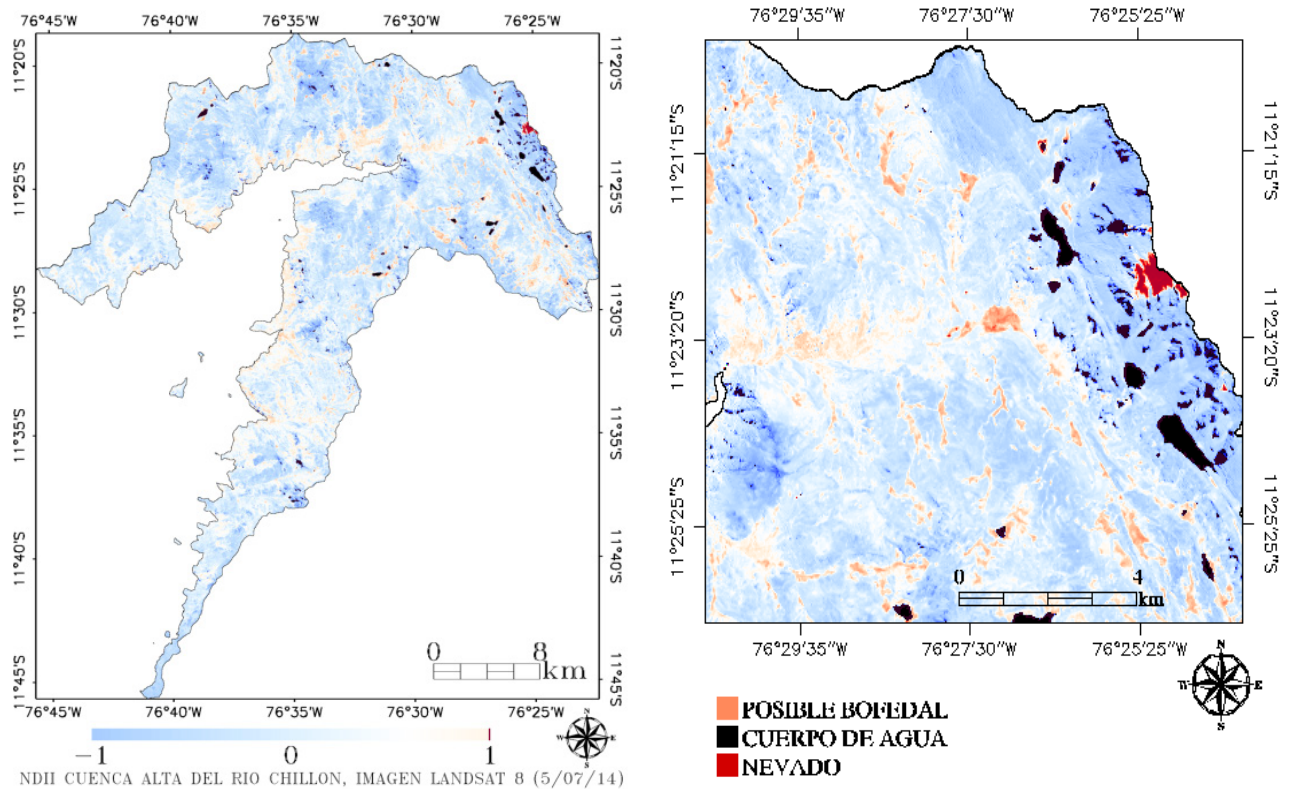


Figura 13. A) Distribución espacial del NDII de la cabecera de cuenca del río Chillón.
 B) Distribución espacial del NDII de la zona de estudio.

En la Figura 13A, se muestra el mapa de distribución espacial de NDII de la cabecera de cuenca de río Chillón, observamos que el color negro corresponde a cuerpos de agua. En la Figura 13B, observamos la distribución espacial

de NDII de la zona del bofedal piloto “Chunal”, encerrada en un círculo. Los rangos de distribución del NDII que se obtuvieron para el bofedal piloto están entre 0.002 a 0.47, zonificados en marrón.

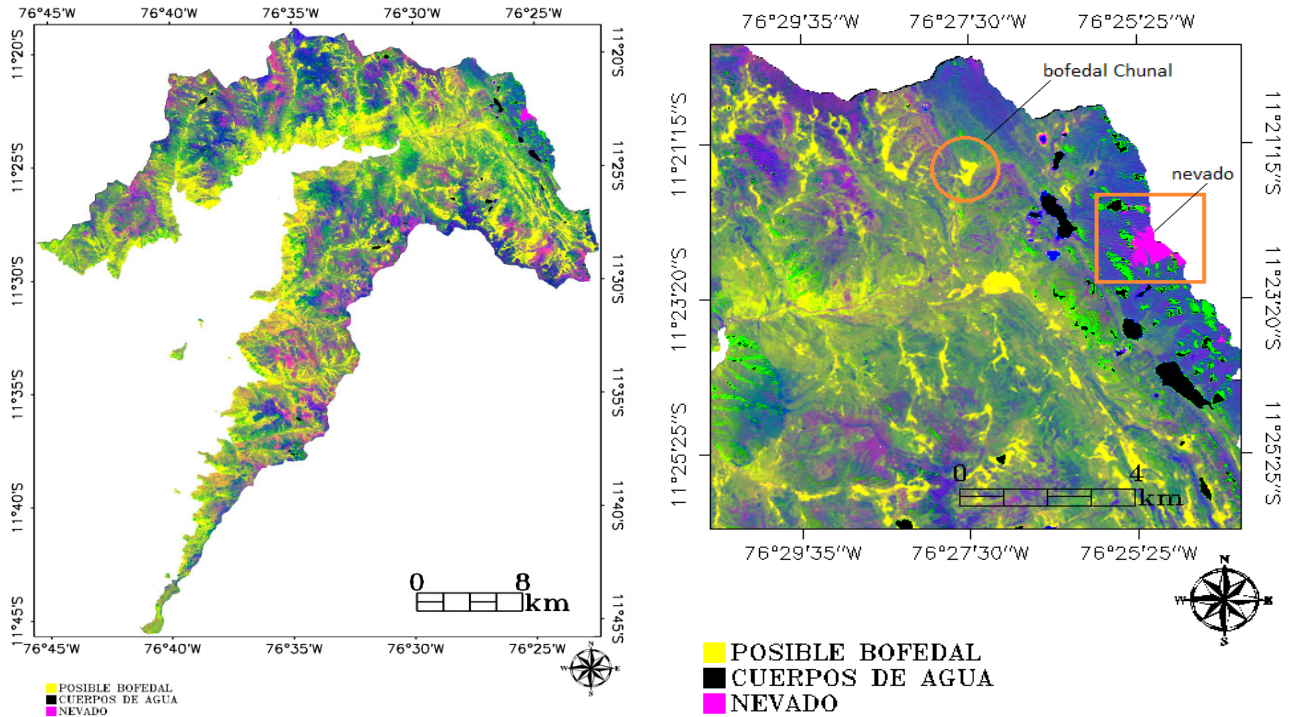


Figura 14. A) Imagen RGB de la cabecera de cuenca del río Chillón. B) Imagen RGB de la zona de estudio, imagen OLI (fecha 05/07/14).

VISUALIZACIÓN DE ÍNDICES EN RGB

Hemos observado que los mapas de distribución espacial de los índices NDVI, NDWI, NDII, individual pueden zonificar con cierto grado confiabilidad a los bofedales. Seguidamente se procedió a visualizar los índices en RGB; R (NDII), G (NDVI), B (NDWI) (Figura 14A). En la

zona cercana al bofedal piloto, encerrada en un círculo, la visualización RGB resaltó muy claramente los bofedales, y otras clases presentes en la escena, los bofedales se observan en color amarillo, los cuerpos de agua de color negro, los nevados de color rosado y los suelos de tonos de color azul y verde (Figura 14B).

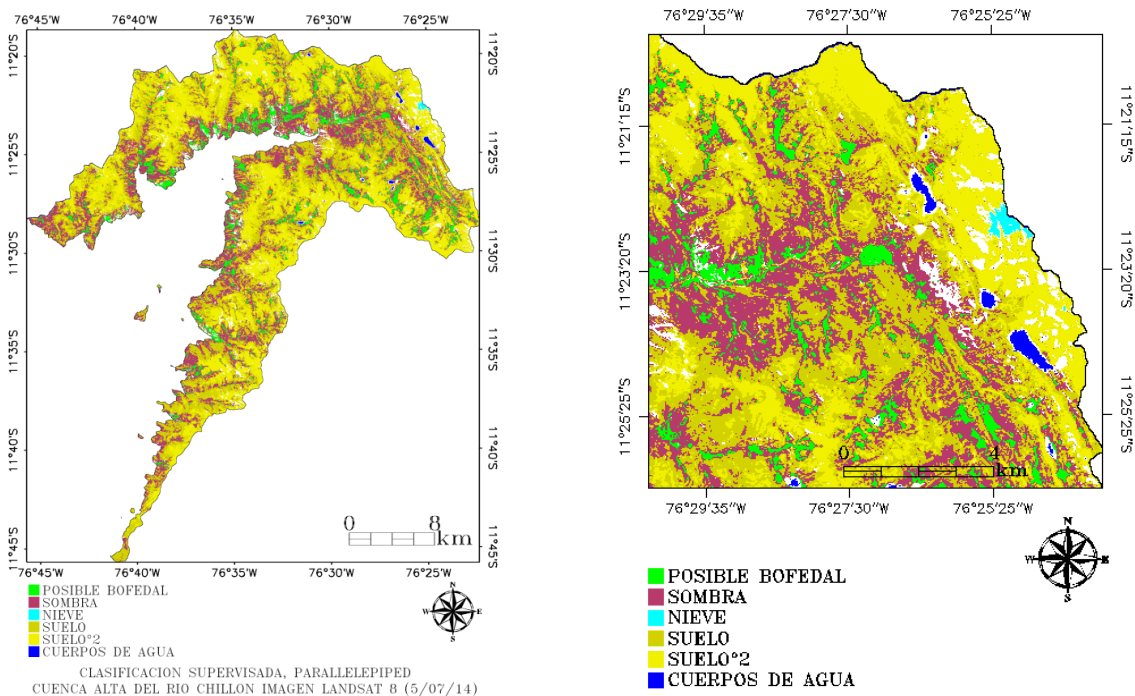


Figura 15. A) Resultado de la clasificación supervisada de la cabecera de cuenca del río Chillón. B) Resultado de la clasificación supervisada de la zona de estudio.

CLASIFICACIÓN PARALELEPÍEDA

En la Figura 15A, observamos la clasificación supervisada paralelepíeda de la cabecera de cuenca del río Chillón, pero debido a que la extensión de los bofedales es pequeña comparada con el total de la cuenca, se generó otro mapa de la clasificación paralelepíedo de los lugares cercanos al bofedal piloto (Figura 15B).

PENDIENTE DEL BOFEDAL PILOTO CHUNAL

Como se ha mencionado anteriormente una de las características de los bofedales es su poca pendiente, para elegir la pendiente adecuada en los trabajos de campo se tomó en cuenta varios perfiles del bofedal piloto Chunal, además se consideró los bordes ya que en dichos bordes aún presentan características de bofedal. Se realizaron tres líneas paralelas en la parte superior, media e inferior, en

cada línea se calculó la pendiente máxima, considerando los bordes, y luego se realizó un promedio de estas pendientes, se obtuvo como resultado que el valor promedio máximo de la pendiente es de 15° (Figura 16).

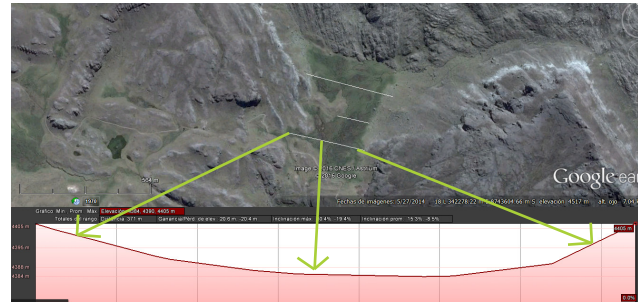


Figura 16. Cálculo de la pendiente. Se aprecia el bofedal piloto Chunal con las líneas de los perfiles usados para calcular la pendiente, corroborada con los trabajos de campo.

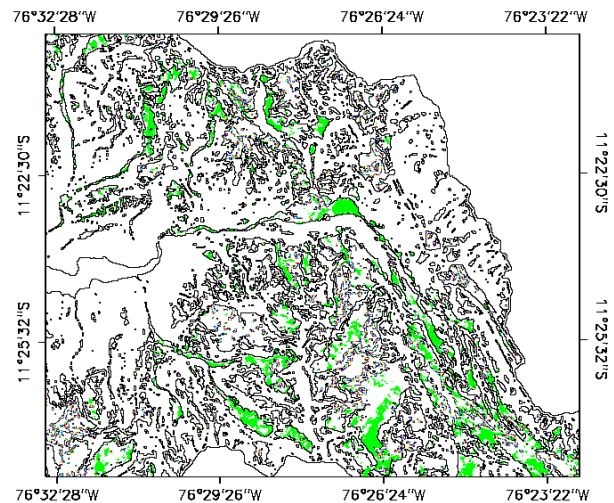
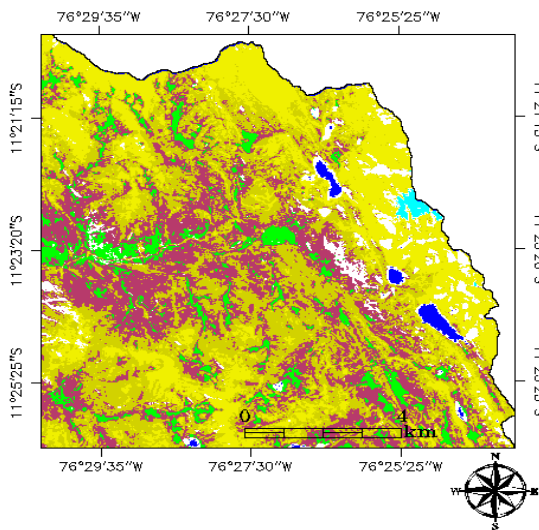


Figura 17. A) Mapa de clasificación paralelepíeda de la zona de estudio.
B) Mapa de la clasificación paralelepíeda sólo con la clase bofedal con pendientes de 0° a 15°.

GENERACIÓN DEL VECTOR DE PENDIENTES

Se generó, con el DEM, el vector de pendientes en el rango de 0° a 15° con el objetivo de zonificar los bofedales según su pendiente, que le permite la acumulación de agua y circulación permanente (Figura 17).

GENERACIÓN DEL MAPA DE BOFEDALES

Finalmente se generó un mapa de bofedales, con esto se pudo cuantificar las diferentes clases obtenidas para toda la cabecera de cuenca del río Chillón, obteniéndose que el número aproximado de hectáreas de bofedal con alturas superiores a los 3,800 msnm y utilizando pendientes de 0 a 15 grados fue de 1,862.55 hectáreas (ha) que representa el 0.76% del área total de la cabecera cuenca (Figura 18).

VALIDACIÓN

Del mapa de bofedales generado, se tomaron 51 zonas consideradas bofedales y se exportaron y verificaron mediante las imágenes del programa informático Google

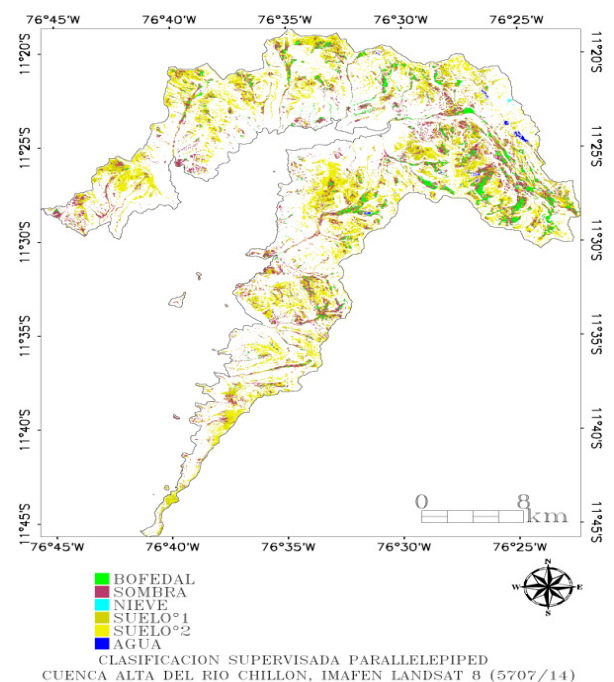


Figura 18. Mapa de bofedales (Método Índice) de la cabecera de cuenca de río Chillón.

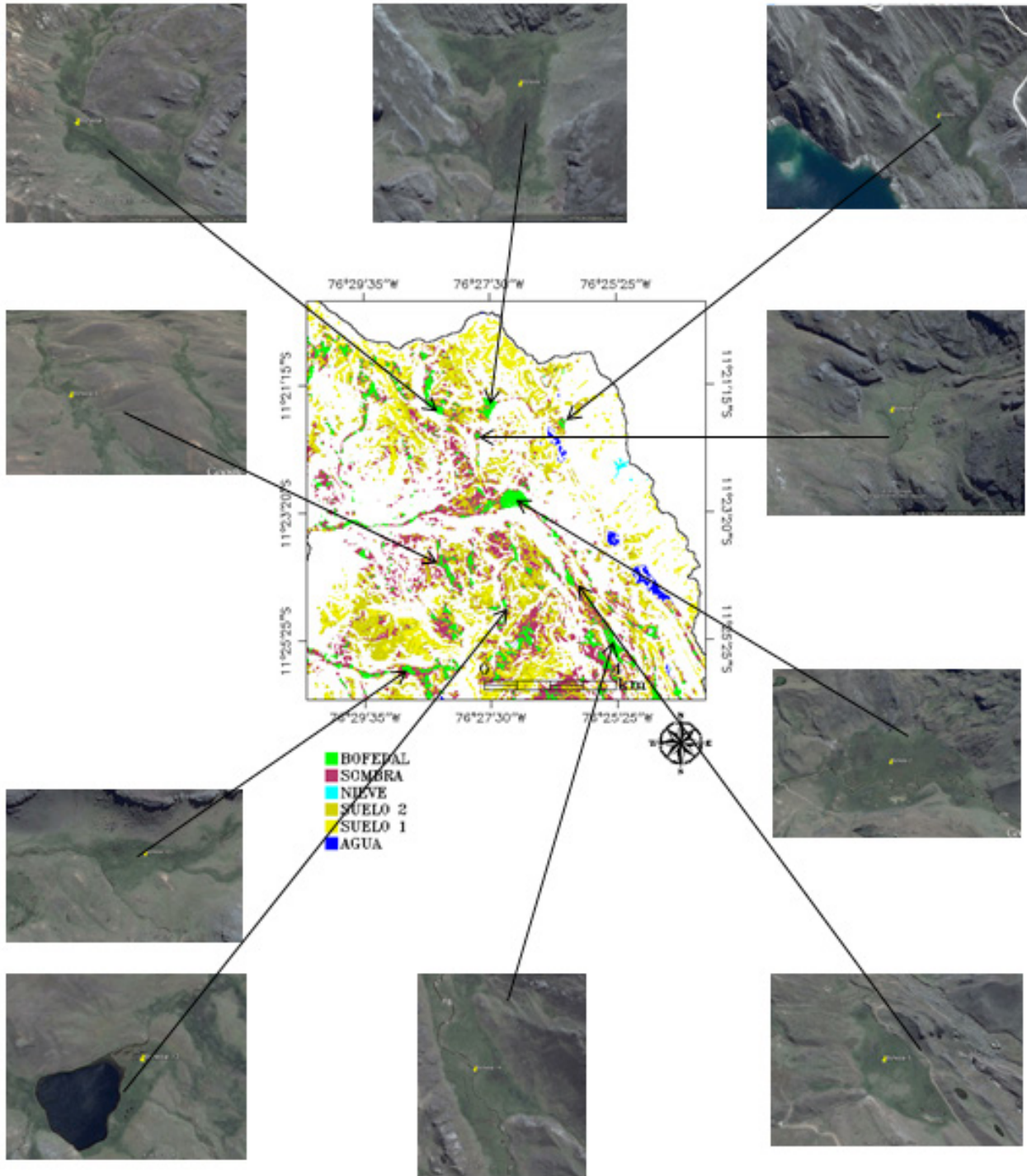


Figura 19. Bofedales mapeados (Método Índices) exportados y verificados mediante el programa informático Google Earth Pro.

Earth, de las cuales 49 zonas resultaron siendo bofedal, que es un aproximado de 96% de acierto. En la Figura 19, se aprecia el mapa de la clasificación de los lugares cercanos al trabajo de campo, (centro de la imagen), de aquí se distinguen algunas zonas, señaladas con fechas, que se usaron para verificar el Método Índices. Se observa en las imágenes del programa Google Earth Pro que las zonas a verificar corresponden claramente a bofedales.

GENERACIÓN DEL VECTOR DE BOFEDALES, MÉTODO ÍNDICES

Una vez que se ha verificado la metodología, se procedió a realizar un vector de bofedales de toda la cabecera de cuenca de río Chillón (Figura 20A) y de las zonas cercanas a los trabajos de campo (Figura 20B).

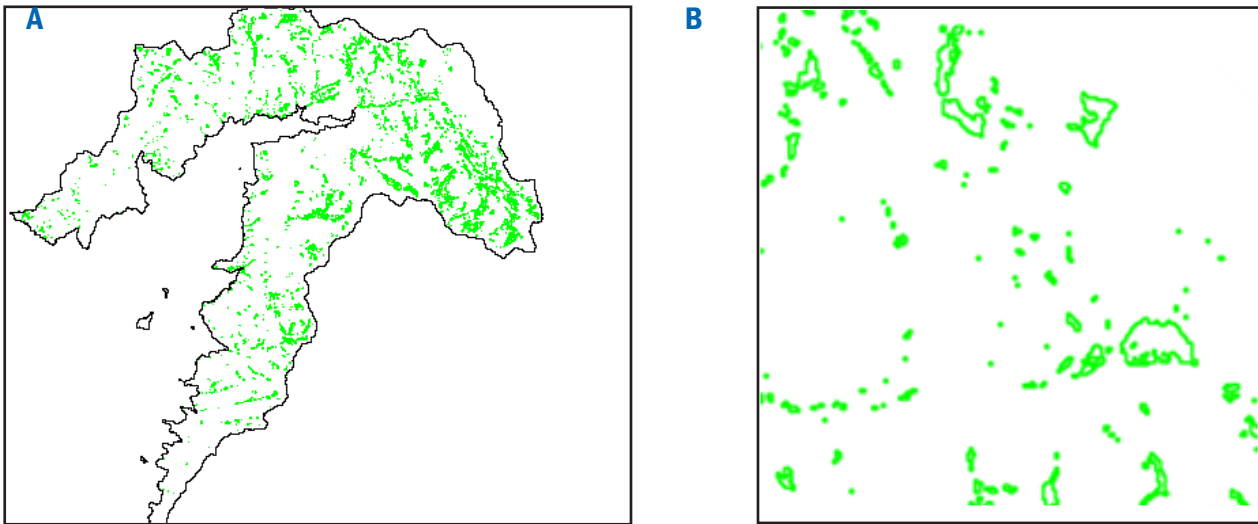


Figura 20. A) Vectores de bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón. B) Vectores de bofedales de las zonas cercanas al trabajo de campo.

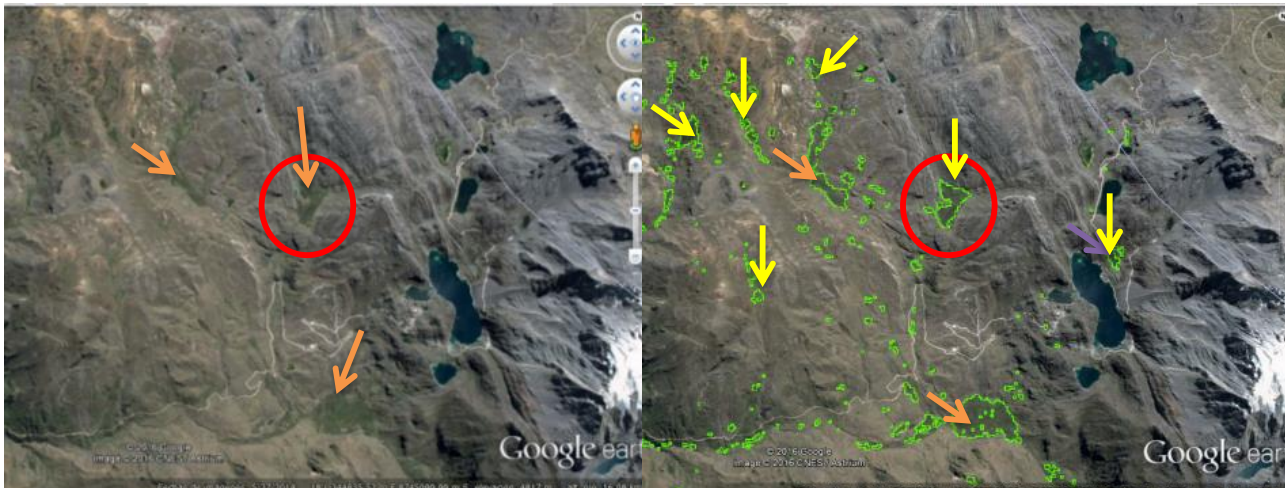


Figura 21. A) Zona de trabajo de campo, imágenes del Google Earth. B) Vectores de bofedales exportados al Google Earth. Flechas naranjas indican los bofedales identificados en la visita de campo; flechas amarillas indican otros bofedales mapeados.

GENERACIÓN DEL VECTOR DE BOFEDALES, MÉTODO ÍNDICES

Una vez que se ha verificado la metodología, se procedió a realizar un vector de bofedales de toda la cabecera de cuenca de río Chillón (Figura 20A) y de las zonas cercanas a los trabajos de campo (Figura 20B).

VECTORES DE BOFEDALES, MÉTODO ÍNDICES EXPORTADOS AL GOOGLE EARTH

Una vez generados los vectores de bofedales, se procedió a exportarlos al programa informático Google Earth Pro para visualizar cómo estos vectores calzan en los bofedales presentes en el Google Earth Pro (Figuras 21 y 22).

En la Figura 21A, observamos una imagen del programa informático Google Earth de fecha 27 de mayo del 2014, correspondiente a la zona cercana al trabajo de campo, en ella se observa los bofedales presentes, marcados con flechas naranjas. En la Figura 21B, se observa que el vector de bofedales encaja muy bien en la imagen del programa informático Google Earth; además delinea otros bofedales grandes y pequeños, presentes en la imagen señalados con flechas amarillas.

MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL NDVI NDWI Y NDII DE LOS BOFEDALES

Para generar el mapa de distribución espacial del NDVI, NDWI y NDII solo de bofedales se utilizó el vector de bofedales.

Para el NDVI se obtuvieron los siguientes valores: el mínimo fue de 0.436, el máximo de 0.832 y el valor promedio fue de 0.602. En la Figura 22, apreciamos el mapa de la distribución espacial del NDVI de los bofedales cercanos a la zona de los trabajos de campo. Aquí, mientras más oscuro es el verde aumenta el valor del NDVI y es más saludable la vegetación del bofedal.

El mapa del NDWI de los bofedales mostró que el valor mínimo fue de -0.851, el máximo de -0.513 y el valor promedio de -0.672. En la Figura 23, observamos que los bofedales presentan tonalidades en azul. El NDWI indica la humedad del suelo, pero como los bofedales se encuentran saturados principalmente de vegetación y agua, el valor del NDWI en los bofedales se presenta con rangos negativos, zonificando de esta manera a los bofedales en color azul.

El mapa del NDII de los bofedales mostró los siguientes valores: mínimo es 0.003, máximo es 0.479 y el valor

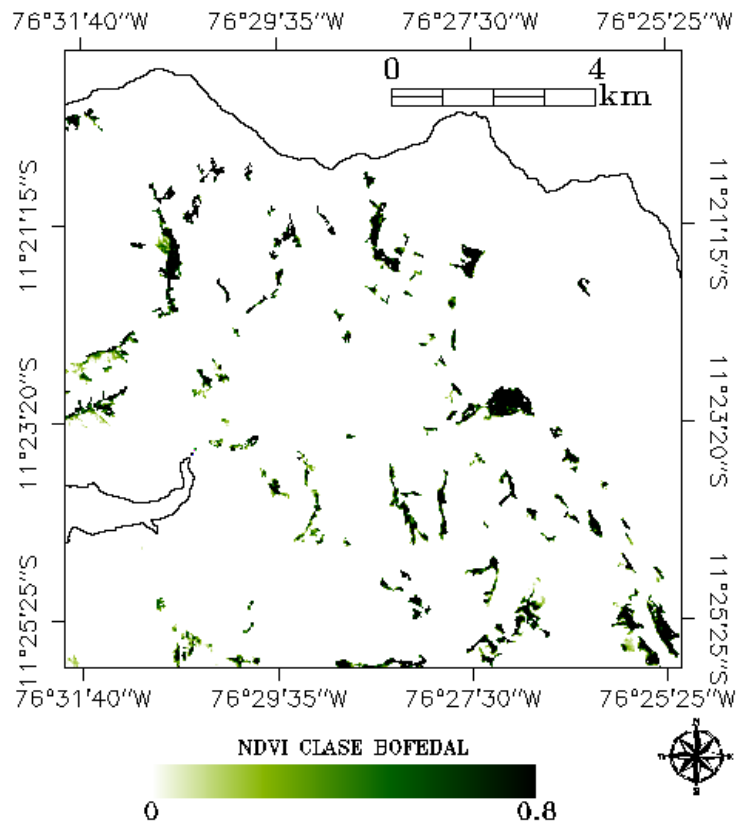


Figura 22. Mapa de distribución espacial del NDVI de los píxeles correspondientes a la clase bofedral.

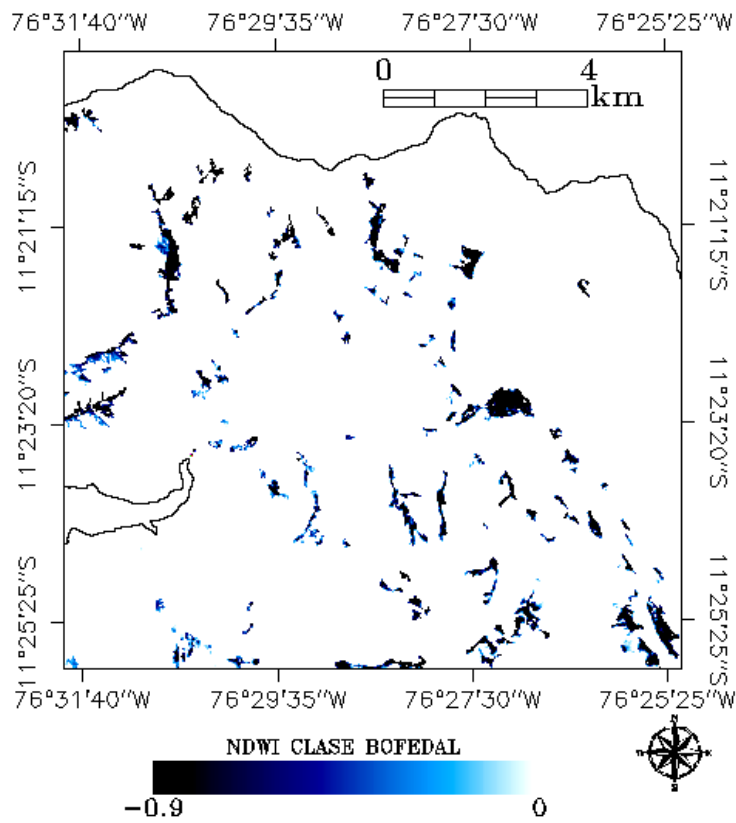


Figura 23. Mapa de distribución espacial del NDWI de los píxeles correspondientes a la clase bofedral.

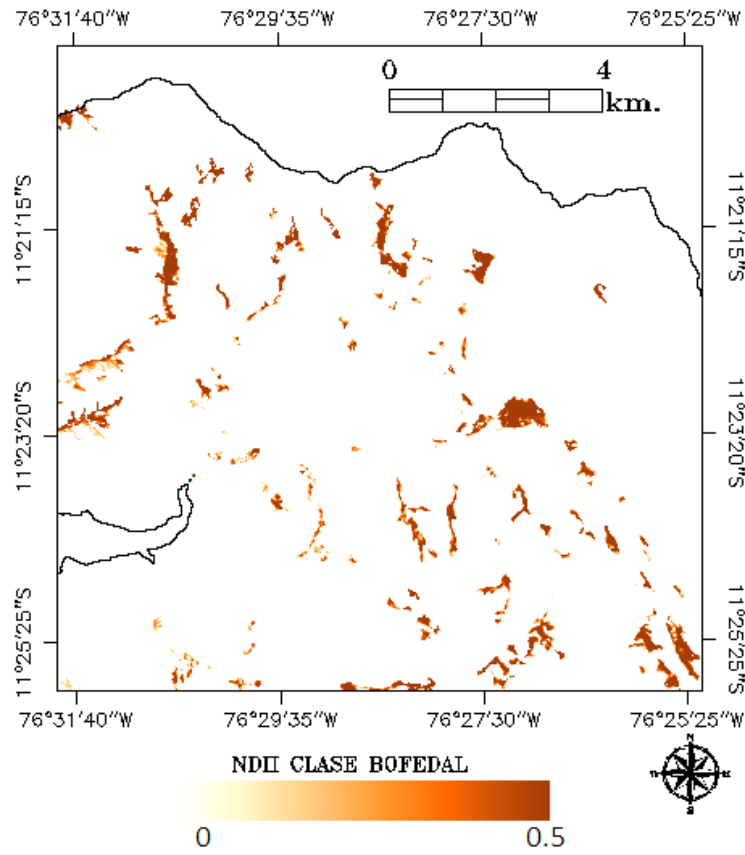


Figura 24. Mapa de distribución espacial del NDII de los píxeles correspondientes a la clase bofedal.

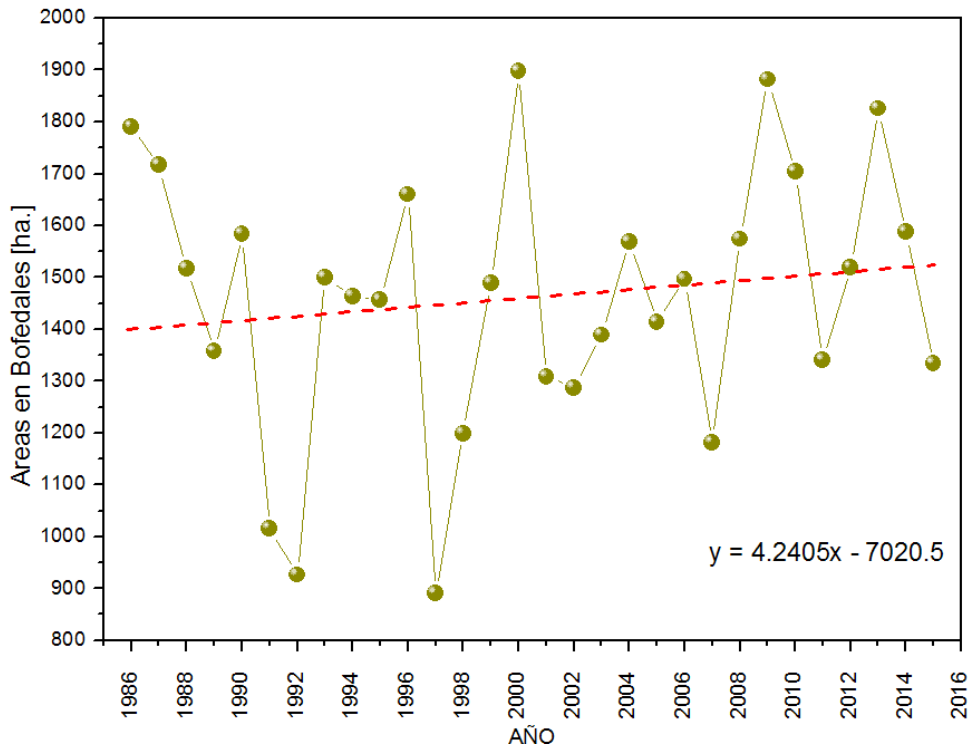


Figura 25. Se aprecia la cantidad de áreas totales de bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón a lo largo del tiempo. Observamos que existe una dinámica en cuanto a la cantidad de área.

promedio de NDII es 0.158. En la Figura 24, se aprecia que los bofedales presentan tonalidades en marrón; mientras más oscuro es el marrón, el valor del NDII aumenta y la vegetación del bofedal es más saludable.

ÁREA DE LOS BOFEDALES TOTALES EN EL PERIODO 1986 AL 2015

Siguiendo la metodología expuesta se realizó el cálculo de las áreas de los bofedales para cada año desde 1986 al 2015, en 30 imágenes. Se pudo observar que existe una variación de áreas totales de los bofedales de la cabecera de cuenca del río Chillón (Figura 25).

CONCLUSIONES

Las características fisicoquímicas encontradas en el bofedal piloto fueron: T = 12.4 °C, pH = entre 4.7 y 6.51 (fuertemente ácida a ligeramente ácida). La EC fue 0.2 ds/m (el suelo del bofedal no es salino), el VWC obtenido fue de 0.46. La DRX de todas las muestras revela picos que corresponden principalmente a albite y quartz.

Las principales características del bofedal son la poca pendiente, máxima de 15° según lo observado en el bofedal piloto, vegetación permanente y la humedad constante. En base a esto se calcularon los índices NDVI, NDWI, NDII, que por separado zonifican con cierto grado de exactitud a los bofedales.

Una adecuada visualización de estos índices en RGB, como por ejemplo R (NDII), G (NDVI) y B (NDWI) puede resaltar aún más las zonas en las que están presentes los bofedales.

La clasificación más efectiva, aplicada al R (NDII), G (NDVI) y B (NDWI), para el mapeo de los bofedales fue la clasificación supervisada en paralelepípedos.

Para incluir la característica topográfica fue necesario el uso de un vector de pendientes de 0 a 15°, generado por el DEM y aplicado a la clasificación en paralelepípedos

Los valores de NDVI que zonificaron a los bofedales fueron: valor mínimo 0.436, máximo 0.832 y el valor promedio 0.602. Los valores de NDWI que zonificaron a los bofedales fueron: valor mínimo -0.851, máximo 0.513 y el valor promedio -0.196. Los valores de NDII que zonificaron a los bofedales fueron: valor mínimo 0.003, máximo 0.479 y el valor promedio 0.158.

Los índices NDVI, NDWI, NDII y el área de los bofedales de la cuenca del río Chillón presentan un comportamiento dinámico como se observa para el periodo 1986 al 2015

Las áreas de los bofedales para el periodo 1986 al 2016 tienen un comportamiento variable, con valores que van desde 890 ha hasta 1,897 ha. La dinámica de estos procesos podría depender de procesos climáticos o antrópicos. Dichos procesos están siendo analizados en nuestros laboratorios.

REFERENCIAS

Amiel, R. (1964). *Características hidrogeológicas de los ríos Rimac y Chillón*. Clase Tesis: Bachiller en Ciencias Geológicas. Tesis de grado: Ingeniero Geólogo. Lima, Facultad de Geología, Minas,

Metalurgia y Ciencias Geográficas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

De Steven, D. y Toner, M. M. (2004). Vegetation of upper coastal plain depression wetlands: Environmental templates and wetland dynamics within a landscape framework. *Wetlands*, 24(1), 23–42.

Flores, D. (2002). *Identificación y análisis de cambios en bofedales de la Cordillera Occidental y del altiplano de Bolivia*. Tesis de maestría profesional en “Levantamiento de recursos hídricos (manejo y conservación de cuencas)”. Santa Cruz, Bolivia, Internacional Institute for Infrastructural Hydraulic and Environmental Engineering, Universidad Mayor de San Simón.

Lafuente, A., Velazco, A., Alzérreca, H. y Cardozo, A. (1988). Evaluación de la Productividad de Campos Nativos de Pastoreo en Ulla Ulla. En *Primera Reunión Nacional en Praderas Nativas de Bolivia*, 56-64. Oruro, Bolivia, Programa de Autodesarrollo Campesino, Corporación Desarrollo de Oruro (PAC, CORDEOR).

Lagos, N. A., Paolini, P., Jaramillo, E., Lovengreen, C., Duarte, C. y Contreras, H. (2008). Environmental processes, water quality degradation, and decline of waterbird populations in the Rio Cruces wetland, Chile. *Wetlands*, 28(4), 938–950.

MINAM. (2015). *Memoria descriptiva del mapa de cobertura vegetal del Perú*. Lima, Ministerio del Ambiente (MINAM).

Olarte N., B. (2002). *Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos en el distrito de Carabayllo, Lima*. Tesis para optar el grado de magíster en ingeniería sanitaria y ambiental. Cali, Colombia, Universidad del Valle.

Pérez, M. E. y García, M. P. (2004). Análisis de la contaminación hídrica en humedales de ambiente semiárido aplicando teledetección (La Mancha, 1992-2001). *Estudios Geográficos*, 65(254), 101-119.

Prieto G., Alzérreca, H., Laura, J., Luna, D. y Laguna, S. (2001). *Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S*. La Paz, Editorial Plural Editores.

Salvador, F., Moneris, J. y Rochefort, L. (2014). Peatlands of the Peruvian puna ecoregion: types, characteristics and disturbance. *Mires and Peat*, 15(3), 1–17. Online at: <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map15/map1503.php>

Sotomayor, M., Canahua, F. y Vargas, B. (1990). *Validación de cercados y mejoramiento de bofedales en puna seca (ahijaderos)*. Avances. Proyecto Alpaca, Serie Pastos, Informe Técnico 34. Puno.

Suarez, A. W. (2012). *Evaluación del régimen hidrológico en la cuenca del río Chillón para escenarios de cambio climático*. Lima, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua.

CÓMO MUEREN LOS PUMAS: DEL MITO AL RITO EN HUARAZ (CENTRO-NORTE DEL PERÚ)¹

How Pumas Die: Myth and Ritual in Huaraz (Central-Northern Peru)

Doris Walter²

RESUMEN

Este artículo presenta algunos nuevos datos etnográficos acerca del simbolismo del puma en los Andes. A partir de relatos en quechua recogidos en la zona de Huaraz (centro-norte del Perú), sacamos a luz la percepción colectiva de este animal. Luego, mediante un mito, también presentado en quechua, mostramos que el puma es una representación simbólica de los antepasados. Estos discursos nos revelan el contexto que permite comprender la función simbólica de la grasa de puma, así como un rito de paso ocasional al momento de la muerte.

Palabras clave: *Puma, representaciones, mito, grasa, Andes, Cordillera Blanca*

ABSTRACT

This paper presents new ethnographic data on puma symbolism in the Andes. Through samples of speech collected in Quechua in the area of Huaraz (central-northern Peru), I first describe how the animal is collectively perceived. Next, I analyze a myth, also in Quechua, which shows that the puma is a symbolic representation of the ancestors. This provides the key which enables us to understand the symbolic value of puma fat, as well as an infrequent ritual which is carried out at the moment of death.

Keywords: *Puma, representations, myth, fat, Andes, Cordillera Blanca*

INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta algunos datos etnográficos relativos a la percepción del puma (*Felis concolor*) por los campesinos quechuhablantes de la región de Huaraz. Más precisamente, con respecto a las relaciones entre el puma y el hombre, proponemos mostrar cómo los discursos acerca de los encuentros reales con este animal, así como las creencias y las prácticas que resultan de la utilización de su grasa, se sustentan en un mito.

Diversos estudios etnohistóricos y etnológicos se han propuesto mostrar la riqueza del simbolismo del puma en las culturas andinas. Este tema ha sido estudiado, para la época incaica, entre otros por Zuidema (1985: 183), quien analiza la utilización del “símbolo del león” por la sociedad cusqueña. Este autor examina el rol del puma en los mitos y rituales antiguos, y propone una reinterpretación de la metáfora que hace aparecer a la ciudad del Cusco como el cuerpo de un puma. La existencia de una estructura felina, subyacente a la organización espacial de la localidad de Jesús de Machaca, en Bolivia, ha sido sugerida por Albó (1972: 773). Por otro lado, Urton (1985: 251) ha demostrado cómo las relaciones simbólicas y metafóricas que existen entre ciertos animales salvajes y el hombre corresponden a las diferentes etapas de la vida humana. El puma representa, en este respecto, la etapa de la madurez y de la vejez. Se debe mencionar igualmente el artículo de Cereceda (1990), que muestra cómo ciertas plantas y animales salvajes (tales como el puma) son considerados como reliquias del pasado y poseen un “doble” en el dominio de lo cultivado o de lo doméstico. Entre los raros trabajos de orden antropológico llevados a cabo en la región de Huaraz, citemos los escritos de Yauri Montero (1990; 1993), que contienen testimonios y reflexiones interesantes. El material etnográfico que sigue, al mismo tiempo que confirma los análisis de estos diferentes autores, aporta algunos elementos suplementarios, contribuyendo así a una mejor comprensión de la importancia del puma en los Andes.

El área geográfica que nos interesa comprende las quebradas de Cojup, Quillcayhuanca y Shallap, situadas al este de Huaraz, en la Cordillera Blanca. Son quebradas profundas, a 3800 metros de altitud, separadas unas de otras por crestas rocosas escarpadas que se elevan a 5000 metros. El fondo de estas quebradas se encuentra cerrado por picos glaciares que culminan a más de 6000 metros. Formidables cercados naturales, estas quebradas están destinadas casi exclusivamente a la crianza: bovinos y equinos pastean libremente, bajo la vigilancia distante de algunos guardianes. En cuanto a los campesinos, ellos viven ya sea en los pueblos, ya sea en viviendas dispersas, al exterior de las quebradas.

Es en este vasto dominio—que corresponde, en quechua, al piso ecológico de la **hallqa**³—que vive el puma. Según el decir de los campesinos, la población felina es poco

¹Nota de la Redacción: Una versión anterior de este artículo fue publicada en francés en 1997 en el *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 26(3), 447-471. Lima.

²Investigadora independiente.

³ La zona de la **hallqa**, que se extiende desde alrededor de 3800 metros de altitud hasta el pie de los glaciares, se opone a la del **bahu** (por debajo de 3800 metros).

numerosa: dos o tres familias solamente, que se desplazan de una quebrada a otra. De día, el puma se resguarda en los bosquecillos densos de quenuales (*Polylepis* sp.), que cubren los flancos abruptos de las quebradas; de noche, desciende al fondo de las quebradas para ponerse al acecho de su presa, pero es inusual que deje el piso de la **hallqa**.

El hombre siente hacia el puma un temor mezclado con cierto respeto. Ocasionalmente lo mata, aduciendo el hecho que este depredador nocivo también es capaz de atacar al hombre. Pero más a menudo, cuando los campesinos sienten la presencia cercana del animal, buscan alejarlo asustándolo. De noche, encienden grandes fogatas,

incendiando directamente la vegetación circundante (gramíneas y matas de mangalaria, que se consumen liberando un humo espeso). Pero existen otras tácticas. Es así que me relataron la expedición colectiva que se llevó a cabo, hace algunos años, en la quebrada de Cojup, a fin de expulsar al puma de ahí: sesenta hombres recorrieron la quebrada de noche haciendo reventar cohetes a cada paso. Uno de ellos, recordando el evento, comentó con ironía: “¡A ese puma, le hemos hecho su fiesta!”.⁴ No obstante, la victoria de los campesinos solo es pasajera, puesto que apenas se le pasa el susto, el puma retoma posesión de la quebrada.



Puma (*Felis concolor*). Foto: © E. J. Peiker. Todos los derechos reservados. Usada con permiso.

Consideremos ahora los relatos de los encuentros:

1. LOS RELATOS DE LOS CAMPESINOS ACERCA DE SUS ENCUENTROS REALES CON EL PUMA

Los fragmentos de conversaciones que siguen, grabados en quechua entre setiembre de 1996 y junio de 1997, nos hacen descubrir un puma con comportamiento extraño⁵. Por un lado, aparece dotado de una ferocidad y de una fuerza decididamente animales y, por otro lado, de rasgos casi humanos. Después de haber presentado a este ser ambivalente, intentaremos interpretar el discurso de los campesinos.

1.1 Las características animales del puma: ferocidad y fuerza

Los guardianes de ganado (o repunteros) de la quebrada Shallap estaban conmocionados: uno de ellos, José, que se había encontrado el día anterior frente a frente con dos pumas, instaba a sus compañeros a observar la mayor prudencia, en el caso en que fueran al fondo de la quebrada. Sobre todo, insistía para que no se aventuraran solos. El viejo Julián me explicó entonces el peligro que acecha a aquellos que se acercan al felino:

⁴ Esos cohetes, que explotan con un chorro de chispas, se utilizan con profusión durante las fiestas de los pueblos.

⁵ El quechua de Huaraz es una variedad del Quechua Ancashino, que pertenece al Quechua Central (Julca Guerrero, 2009: 39). La grafía corresponde generalmente a la del castellano. Señalemos, no obstante, algunas excepciones: ay [e:]; uy [i:]; aw [o:]. Las vocales largas se doblan, por ejemplo: rikaa [rika:].

JF: [...] Tsaychawshi ari kan. Josémi niyaamarqun: “Ishkayki aywarqa aywayanki. Tsayqa hukllaqllataqa qatikachaykar mikuyashunkiman nimarqunmi. Wayway mamash kayampis. Hinampish!

MC: ¿Ishkay?

JF: Aashi.

MC: Atakakunchi puma...

JF: Tsarikurniyki, ¿imataraq ruraykushunkiman? ¿Es animal, pués! (...) Huk kutaykushuptiyki, maytaraq aywankiman? Hukllayllawanchi wanurillashwampis. Imanaw karraq, qinwatapis shapillaqpaqyan kutan.

MC: ¿Imanir? ¿Kolerashqa kar?

JF: Ahaa. Sikinta bwenu uqtipariykurshi, ishkay kutaykamun.

Bolantirin qinwapis⁶ [...]

JF: [...] Aquí, de hecho [el puma] existe. José nos dijo: “Si ustedes van [a la quebrada], vayan juntos los dos. Ese [puma] podría comérselos a ustedes persiguiendo solo a uno [de ustedes]. Están el pequeño y la madre. ¡Ella es enorme!”

MC: ¿Hay dos?

JF: Es lo que dice él.

MC: El puma ataca seguramente...

JF: Si te atrapara, ¿qué sería capaz de hacerte? ¡Es un animal! (...) Si te diera un puñetazo, ¿dónde te encontrarías? Con un solo [puñetazo], hasta podríamos morir. Dios sabe cómo, también le da un puñetazo al quenua hasta sacudirlo.

MS: ¿Por qué? ¿Porque está molesto?

JF: Sí, así es. Escarbando bien el pie [del árbol], le da dos puñetazos. El quenua también se vuelca [...].”

De esta conversación surge la imagen de un animal enorme y agresivo, que persigue al hombre para comerlo⁸. Por otro lado, aparece antropomorfizado: aunque dotado de garras, da puñetazos con una fuerza tal que le permite derribar árboles.

El fragmento de discurso siguiente describe el ataque de furia que arrebató a un puma, justo antes de morir envenenado. Curiosamente, su rabia se concentra también en los árboles.

MC: [...] Montikunatapis limpu tirar, kashakunatapis limpu tirar, hinampi hinampish imayka... Después qukarishqa kanaq. ¡Wamayaypaq, tremendo puma

kanaq! Qaqakunatapis montikunatapis pedazo ushakatsishqa kanaq ashpir.

MC: [...] Arrancando completamente los árboles, arrancando completamente los arbustos espinosos, íntegramente... Luego, se quedó echado tieso. ¡Era un puma gigantesco, de temer! Había roto las rocas en pedazos, y los árboles también, desgarrándolos.

Cada una de las garras del puma es comparada con un instrumento tajante⁹:

AL: Pumapa shillun haachan, kuchillun, ñabahan, serruchun, macheetin...

MC: ¿Imantaq haachanqa?

RL: Shillunlla ari. Hayshi ishkan makinwan kinwaptapis qap! nishpa qupiramun.

AL: La uña del puma es su hacha, su cuchillo, su navaja, su serrucho, su machete...

MC: ¿Qué cosa es su hacha?

RL: Su garra, simplemente. Por eso, con sus dos manos, el quenua también “¡qap!”¹⁰, logra romperlo.

Otros relatos describen el coraje y la resistencia sobrehumanos del felino, especialmente cuando sus partes vitales han sido tocadas por una bala de fusil. Aquí está un ejemplo:

NM: [...] Potreruchaw Ewshi Hamanka illapaykunaq aqishnin yarquqpaq. Despuéshi shaaranqanta “waw!” nishpa uqshata rachirkur aqishninta kutirkatsir haywan laturkur ayqipa hiqarin. Killkaywankaman aywkunaq haynaw. (Manash) alkansayaanaqtsu.

MC: ¿Ah sí? Sellaama fwertichi...

NM: Fwerti ari. ¿Mishipis manaku siete vidas?

NM: [...] En Potrero, Eushi Jamanka le disparó una bala [en el vientre] que le hizo saltar las tripas. Entonces, fijo de pie, rugiendo “¡waw!”, rompiendo uqsha¹¹, metiendo adentro sus tripas, tapándolas con eso, [el puma] se fue corriendo. Se fue así hasta Quillcayhuanca.

[Los cazadores] no lo alcanzaron.

MC: ¿Ah sí? Debe ser muy fuerte...

NM: Es muy fuerte, de hecho. ¿No ves que el gato también tiene siete vidas?¹²

1.2 Los comportamientos casi humanos

El diálogo anterior continúa. El puma aparece con una destreza en sus manos sorprendente y una caminata humana:

DW: ¿Imanawtaq uqshata ayllun?

⁶ Se encuentra el término **qinwa** o **qinwal**, según el grado de “castellanización” del discurso de los interlocutores.

⁷ Según la glosa de mis informantes, la condición animal corresponde aquí a “la peor de las cosas”.

⁸ Cuántas veces habré oído la advertencia siguiente, proferida al caminante solitario de la **hallqa**: “¡Puma mikushunkiman yaw!” (“¡Cuidado, el puma te podría comer!”). Esta frase me pareció corresponder al registro de la broma, hasta el día en que yo misma fui seriamente amonestada por una mujer de la **hallqa**: según ella, yo había demostrado una total inconsciencia al ir a pasar la noche, no acompañada, en una cresta. Estos lugares, designados por el topónimo **Puma wayi** (“casa del puma”), tienen la reputación de estar habitados por este peligroso carnívoro.

⁹ Los campesinos describen con admiración los hábitos alimenticios extremadamente higiénicos del puma: dicen que con sus garras, filudas como un cuchillo, corta minuciosamente la piel de su presa y retira las vísceras sin rasgarlas, antes de dedicarse a la carne.

¹⁰ **qap** = el ruido del tronco que se rompe.

¹¹ **uqsha** = gramíneas (*Stipa ichu*).

¹² Un testimonio recogido en la misma región por Yauri Montero (1993: 158) relata hechos similares: el puma, herido por una bala en pleno pecho, ve su corazón rodar al suelo. Con su pata, vuelve a colocar el órgano en su lugar, antes de tapar la herida abierta con una mata de hierba.

RL: Llutirin ari. Sutakacharkun aptarkur.

DW: ¿Makinwan o shiminwan?

RL: Makinwan.

JF: Wichyakumpis, dedunta shiminman yakarkur. Shumaq wichyan.

RL: Llanullapamri.

JF: Makintapis kaynaw nirkurran hiqarin.

MC: ¿Chakinllawan?

JF: Chakinllawanmi.

RL: Shaykar, nunanaw hiqarin.

DW: ¿Cómo recoge la uqsha?

RL: La arranca. La arranca empuñándola.

DW: ¿Con su pata o con su hocico¹³ ?

RL: Con su pata.

JF: Silba también, metiéndose el dedo en la boca. Silba bien.

RL: Silba finamente.

JF: Cruzando sus manos detrás de la espalda¹⁴, se va.

MC: ¿Sobre sus patas traseras?

JF: Sobre sus patas traseras.

RL: Erguido [sobre sus dos patas traseras], se va como una persona.

Según el decir de Julián, los silbidos del puma son idénticos a los de un ser humano. Paseándose un día en la quebrada con un amigo, oyeron silbar a alguien. Sin duda una pastora... Los dos hombres alzan los ojos y divisan un puma:

JF: [...] **Pumataqa rikaariyaa qaqa hananchaw, nunanaw shaakaqta makinta huyturishqa. Nuqantsiknaw qaqatapis pintirin ishkan chakinllawan. Manam siqikantsu. [...]**

JF: [...] Vimos al puma [aperchado] sobre una roca, de pie como un hombre, con su mano en la espalda¹⁵. Como nosotros, salta también sobre las rocas, solo con dos patas. No se cae. [...]

Los silbidos anuncian intenciones agresivas:

DW: ¿Imapaq puma wichyan?

RL: Mikuyta munar. ¿Si no, para qué va a silbar?

DW: ¿Por qué silba el puma?

RL: Porque quiere comer. ¿Si no, por qué silbaría?

NM: (...) **Silba, mamita. Sharkurshi qumpakumpis.**

NM: (...) Silba, mamita. Poniéndose de pie, también lanza piedras.

Otro informante relata que el puma se pone a bailar. Después de lo cual, persigue al hombre precipitando piedras:

VH: Kaynaw qatswan, nunanaw. Qaqa hananchaw qatswakaykamun.

DW: ¿Imanir tushun?

VH: Tushun. Qatswan rikamarnintsik. ¿Cómo será? Haynam qatimarqan. Paqtsachaw. Haynam aywkamurqaa tsampatapis uqtirllana. Sudaypa sudar, Quchapampaman chaykamuu. Hayna pumaqa qatiykamashqa: “¡Waw! ¡Haqraq! ¡Waw! ¡Haqraq!” Wakpa kaypapis rumi shamun. Haytakacharkamushqa pumaqa kaynaw.

VH: Baila de esta manera, como un hombre. Encima de la roca, estaba bailando.

DW: ¿Y cómo baila?

VH: Baila. Baila al vernos. ¿Cómo será eso? Luego, en Paqtsa me siguió. Entonces, me fui de ahí a toda velocidad¹⁶. Sudando abundantemente llego a Quchapampa. El puma me estaba siguiendo. “¡Waw! ¡Haqraq! ¡Waw! ¡Haqraq!”¹⁷ Por aquí, por allá, vienen las piedras. El puma daba patadas (a todos lados) de esta forma.

1.3 Comentarios

Primero que todo, precisemos que la imagen del puma que aparece a través de los relatos de mis informantes es ciertamente el reflejo de una percepción colectiva, pues los comportamientos “extraños” del animal me han sido confirmados numerosas veces por hombres, mujeres y niños en los pueblos.

Luego, se puede pensar que si el puma aparece con características ambivalentes, es que la actitud de los campesinos ante este animal es ella misma ambivalente. Como lo hemos señalado, sienten hacia él un temor mezclado con admiración. Esta actitud parece ser engendrada, de manera más general, por los grandes felinos. Urton lo ha señalado en lo que concierne al puma (1985: 255), Turner en cuanto al jaguar (1985: 63). Turner explica esta ambivalencia de la manera siguiente: como depredador potencial del hombre, el jaguar constituye una amenaza peligrosa, encarnando por ende las fuerzas incontrolables y antisociales de la naturaleza; al mismo tiempo, este animal es admirado por su fuerza, su coraje y su agresividad, cualidades que también son admiradas en el hombre adulto. En la cultura andina, Zuidema (1985) y Urton (1985) han mostrado que el puma representa el modelo de la fuerza y de la sabiduría, cualidades sociales que son particularmente valorizadas en el hombre que ha llegado a la edad de madurez. Todos estos sentimientos se encuentran expresados, de una manera u otra, en nuestros relatos.

Pero ¿de dónde proviene entonces la imagen del puma que camina como un hombre, con las manos cruzadas en la espalda, silbando y saltando de una roca a otra, como alguien que ejecuta una danza? La lectura del artículo de Zuidema (1985), que analiza en particular el uso ritual de las pieles de puma, nos entrega algunos elementos de

¹³Obsérvese que en quechua los términos relativos a la morfología corporal, tales como **maki** (mano), **chaki** (pie), y **shimi** (boca), son idénticos para los seres humanos y los animales. Es así que en el texto quechua el puma aparece aún más cercano al hombre.

¹⁴Literalmente: “sus manos, diciendo esto”. Simultáneamente, JF hacía el gesto correspondiente.

¹⁵Es decir, con las manos cruzadas en la espalda.

¹⁶Literalmente: “escarbando la **tsampa**”. (**Tsampa** significa “terrón”.)

¹⁷Alternancia del puma que grita (**waw**) y de las piedras que se precipitan (**haqraq**).

respuesta. Zuidema cita un pasaje de la Relación quechua de Huarochirí (Taylor, 1987: 65), donde vemos que antiguamente los hombres que habían matado un puma estaban obligados a revestirse con su piel, de manera que los pies, las manos y la cola del animal colgaran en sus espaldas, y que de esta manera se ponían a bailar. Esta descripción—en particular la imagen de las manos del puma en la espalda de los danzantes—¿no se parece a la del puma en las rocas? Por otro lado, Zuidema analiza el rol de los “hombres-pumas” en los rituales de iniciación y en la guerra. Aquí también, estaríamos tentados de ver un vínculo entre la agresividad del puma que lanza piedras sobre los campesinos en las quebradas y una actitud guerrera. Esto hace pensar también en los combates rituales o **tinku**, durante los cuales los hombres se pelean a puñetazos y se lapidan¹⁸. Obsérvese que en Huaraz, en la época del Carnaval, una pareja de danzantes precede la procesión de las cruces: uno de ellos, vestido con una piel de oveja y el rostro cubierto con una máscara negra, representa al puma, mientras que el otro, con sable en mano y un tricornio sobre la cabeza, juega el rol del “capitán” (Cf. Yauri Montero, 1990: 116-117; 1993: 141, 144)¹⁹. Todos estos elementos constituyen pistas que deberán ser profundizadas en un trabajo futuro. Ahora, dirijámonos a un mito que clarifica considerablemente el sentido de nuestros relatos.

2. EL MITO

2.1 El relato

El mito²⁰, recogido de un campesino de la quebrada de Shallap, relata el encuentro de un hombre y un puma. Un resumen del relato ayudará al lector a entender el texto original, presentado en quechua y traducido aquí al castellano.

Un hombre había subido a la **hallqa** para hacer carbón de madera²¹. Se pone a cortar ramas de quenual con un hacha. Un puma lo divisa y se pone a vigilarlo, disimulándose en los árboles. Está estupefacto al ver la facilidad con la que el hombre parte las ramas a partir de su ramificación en el tronco, haciendo un movimiento con el brazo de arriba hacia abajo. Intrigado, decide interrogar al hombre sobre su manera de proceder y sale de su escondite. En presencia del hombre, el puma trata de hacer lo mismo. Da un puñetazo en la horcadura de la rama. Esta no se parte. El árbol solo se mueve. El puma avista entonces un árbol con un gran tronco. Tomando impulso, da un gran puñetazo en el tronco. Como el tronco estaba podrido, el árbol se derrumba. Sin embargo, el puma no está satisfecho, pues quiere lograr hacer lo mismo que el hombre. El hombre, después de haber preparado una muesca en la horcadura de una rama con su hacha, le propone al puma que la parta con un gesto seco, de arriba hacia abajo. El puma le hace caso. Con toda su fuerza, golpea la horcadura de la rama, pero su mano se queda atascada en la muesca. Mientras el puma grita de dolor, el hombre lo masacra con un hachazo.

1. [RL] Huk nunash unay tyempu kashqa kaynaw.

[RL] Antiguamente, había un hombre así.

2. **Karbonta ruranampaq yamtata tsiqtaykashqa tsakita.**

Para hacer carbón de madera, estaba partiendo madera seca.

3. **Chamisata ruranampaq, rurinman mechata churanampaq ruquykashqa.**

Estaba cortando para hacer leña menuda, para encender [la madera] adentro [del horno].

4. **Kaynaw ishkayman qatsashqa.**

De esta manera, partía [la madera] en dos.

5. **Pallqan pallqampa haypana uraypana qatsaq.**

Por la horcadura de la rama, por ahí, hacia abajo partía.

6. **Pumanash monti rurimpita rikaraq.**

El puma lo observaba desde el interior de los árboles.

7. **“¿Imanawtaq taqay cojudo kutan?”**

“¿Cómo da puñetazos ese cojudo?”

8. **Nunaqa rikashqatsu.**

El hombre no lo vio.

9. **[Pumash] kutashqa.**

[El puma] dio un puñetazo.

10. **Qinwalqa kaynaw wiksukaarishqaa.**

El quenual se torció un poco, de esta manera.

11. **Kaynaw nishpa makimpa pallqapa uraypa, nada.**

Pensando de esta manera, con la mano por la horcadura [de la rama] hacia abajo, [no llegaba a] nada.

12. **“¿I taqay cojudoqa imanawtaq pwedin? ¡A ver, voy, carajo! Tapumushaq.”**

“Y ese cojudo, ¿cómo lo logra él? ¡A ver, voy carajo! Voy a preguntar.”

13. **Sellaama rikarashqa nuna rurashqanta.**

El puma observó detenidamente lo que hacía el hombre.

14. **Rikaraykaptin, qinwalta siqirin nunaqa.**

Mientras lo observaba, el hombre tumbó al quenual.

15. **“¡Carajo! ¿Imanawtaq taqayqa ruran?”**

“¡Carajo! ¿Cómo hace [ese hombre]?”

16. **Pallqampita nunaqa kapchushqa.**

A partir de la horcadura, el hombre cortó [la rama].

17. **Haynash aywashqa tapuq. “¡Carajo! A ver, voy.”**

Entonces [el puma] fue a preguntar. “¡Carajo! A ver, voy.”

¹⁸ Cf. los **tinku** de Macha, descritos y analizados por Platt (1978: 1090).

¹⁹ Desafortunadamente, mis informantes no han podido darme más detalles sobre este tema.

²⁰ A pesar de que este tipo de relato sea calificado actualmente por una gran parte de la población como “mentira” o cuento, el narrador en cuestión aquí le atribuye verdaderamente un valor mítico.

²¹ La fabricación del carbón de madera, basada exclusivamente en el uso del quenual, era una actividad económica muy importante en esta región. Sin embargo, el corte de este árbol, clasificado como especie protegida, está prohibido por ley desde 1973 (D.S. N° 1014-73-AG).

18. Haynash chaarishqa, “¿imanawtaq siqirunki?” nishpa, “Maa nuqa probaramushaq.”

Entonces llegó [delante del hombre] diciéndole: “¿Cómo lo has tumbado [el árbol]? A ver, yo voy a tratar.”

19. Qushqatsu ari pumaqa.

El puma no lo logró.

20. Kaynaw kutaypa qushqatsu.

Así, con un puñetazo, no lo logró.

21. Wiksukaarishqalla.

[El árbol] solo se torció.

22. Haynash huk kulluna kaykashqa hatun.

Entonces, había un gran tronco.

23. Kutaykushqa ayqiykur.

Corriendo, dio un puñetazo.

24. Sikin ismunachi kaykarqan ari. “¡Rap!” nishpa aywakushqa.

El pie [del árbol] seguramente ya estaba podrido. ¡Rap! El tronco se volcó.

25. “¡Así yo tiro, carajo!” nishqa. Maa qam haynaw [ruray].

“¡Así yo tiro [puñetazos], carajo!” dijo él. “A ver. Tú, [haz] así.”

26. “Manam pwediitsu” nishqa nunaqa.

“No puedo”, dijo el hombre.

27. “¿Imanawtaq haylaya ushaykunki? Kay qirukuna hitataakun.”

“¿Cómo tumbas tantos [árboles]? Estos trozos de madera están esparcidos por todos lados.”

28. “Nuqa kaynawmi tsiqtaa” nishqa nunaqa.

“Así es cómo yo parto”, dijo el hombre.

29. [MC] Haachawan...

[MC] Con hacha...

30. [RL] Hayshi ari tsiqtarkur “makiykita kaynaw narkur uraypa tsiqtanki.”

[RL] Entonces, habiendo partido [la rama]: “bajando tu mano así hacia abajo, vas a partir.”

31. Pumaqa macheetikushqa con todo fuerza ari.

El puma dio un machetazo con toda su fuerza.

32. Kaykama amukakurkushqa makinqa.

Hasta aquí, se atascó su mano.

33. Hitalaykashqa.

[El puma] estaba tirado [en el suelo].

34. Kachashqanatsu makinta.

[La muesa] ya no soltó su mano.

35. Haynash “¡waa!” qaparishqa qayarishqa.

Entonces, “¡waa!” Gritó. Llamó.

36. “¡Cojudo, carajo!” nishqa nunaqa.

“¡Cojudo, carajo!”, dijo el hombre.

37. Allaapa waapuchi unay nunakuna kayarqan.

Los ancestros eran seguramente muy fuertes.

38. “Kaynawmi, shay, quntsik” nir, finu haachawan quykushqa piqan pintiriqpaq.

“¡Así es cómo nosotros damos [hachazos], hombre!” Con un hacha bien afilada, le asestó un hachazo hasta que saltara su cabeza.

39. ¡Como macheete quykushqa ari oye!

(RL se ríe con sarcasmo) ¡Sí, oye! Le dio un golpe como con un machete.

40. Limpu ushakaarishqa [pumaqa].

[El puma] fue completamente rematado.

41. Qiruchawnachi topaliqpaq, quykurqan huklla.

Hasta que [el hacha] se hundiera en la madera, dio un solo hachazo.

2.2 El contexto mítico

El narrador sitúa entonces el relato dentro de la cronología mítica, precisando que el episodio se desarrolla “en el tiempo en que los animales hablaban”.

42. Nunanawshi parlanaq puma hay tyempuqa.

Como el hombre, el puma hablaba en ese tiempo.

43. Nuqantsiknawshi kanaq.

Él era como nosotros.

44. Kaynaw shaypa puriq.

De esta manera, andaba de pie.

45. Kooripash²²ayqikuq chakipa.

Corría sobre sus patas traseras.

46. Nunata mikuq hayqa ari.

Se comía al hombre.

47. Nuqantsiknaw purikuq chakipa.

Como nosotros, andaba sobre sus patas traseras.

48. Hayshi Diosnintsik mana nunata mikunampaq kastigashqa.

Entonces, Dios lo castigó para que no comiera al hombre.

49. Haynawpash laataypana purin.

Es por eso que camina a cuatro patas²³.

²² El adverbio *kooripa* se deriva del castellano *correr*. El adverbio equivalente construido con una raíz quechua es *ayqipa*.

²³ Literalmente “reptando”. El verbo *laata-*, “reptar, arrastrarse en el suelo”, se aplica más bien a reptiles.

50. Chupan kanaqtsu.

No tenía cola.

51. Mikuq nunata. Cada topadachaw qupiq ari.

Comía al hombre. Cada vez que encontraba uno, lo devoraba.

52. [MC] ¡Allaapa dañino kaq!

[MC] ¡Era muy nocivo!

53. [RL] Nunallatash nuqantsikta mas mikamaq kantsik. Uqrakaqnash kaynaw quebradaman nuna yaykuq, manash yuriqnatsu.

[RL] Al hombre nomás, a nosotros nos comía más. Cuando alguien se perdía y entraba así en la quebrada, ya no aparecía.

54. Haynawpash hayqa nashqa... allqunaw purikun.

Es también por eso que [el puma]... camina como un perro.

55. Hayshi chupayuc.

Desde entonces, tiene una cola.

56. Hirkakunachaw, alalaychaw, yakukunachaw, rashtakunachaw, purikunampaq kastigashqa.

[Dios] lo castigó y lo mandó a vivir en las montañas, en el frío, en el agua, en la nieve.

57. Haynawpash parlayta pwedinnatsu.

Y es también desde ese día que ya no puede hablar.

58. Mishinawna ñawaypapa waqan.

Maúlla como un gato.

En efecto, según una creencia difundida en diferentes regiones andinas, en la era de la humanidad anterior a la nuestra, los animales poseían el uso de la palabra. Como lo comenta V. Cereceda, a propósito de los mitos bolivianos:

“Las grandes disyunciones bíblicas no se habían producido todavía y el mundo no estaba bien diferenciado. Las fronteras eran fluidas entre el humano y el animal: se transformaban fácilmente unos en otros, y los animales sabían hablar [Cereceda, 1990: 73]²⁴.”

Es así que en nuestro mito el puma era bípedo, desprovisto de cola, y hablaba el mismo lenguaje que el hombre. Sin embargo, como se puso a devorar a los hombres con una glotonería excesiva—al punto de amenazarlos de extinción—Dios lo castigó. De esta manera, el puma adquirió su forma y su comportamiento actuales, y fue expulsado a las tierras más ingratas²⁵.

Recordemos que, a su vez, la humanidad primordial fue golpeada con un castigo de origen divino. En la región de Huaraz, como en otras partes de los Andes, los ancestros o abuelitos, fueron aniquilados por una lluvia de fuego,

seguida de un diluvio y de la aparición de varios soles. Si bien algunos hubieron intentado escapar enterrándose debajo de la tierra, todos los ancestros perecieron (Walter, 1994: 57). No obstante, sabemos que en la tradición andina el pasado no ha concluido enteramente y que sigue resurgiendo, bajo distintas formas, en el presente²⁶.

2.3 El análisis del mito

Regresemos ahora al mito. Pone en escena a dos protagonistas de naturaleza diferente, uno de los cuales reviste una forma animal, y el otro una apariencia humana. Los dos individuos se encuentran. Este encuentro es, sin embargo, de corta duración. Desemboca rápidamente en un conflicto, seguido de la masacre del puma por el hombre, o sea, la aniquilación.

Antes de analizar las diferentes secuencias del mito, interesémonos en la identidad del puma. ¿Quién es? Toda una serie de índices tienden, en efecto, a dejar entrever que el puma corresponde a una representación del abuelito. Sin entrar en los detalles, vamos a revisar ciertas analogías impactantes. Primero, recordemos que el abuelito, ancestro que pertenece a la humanidad anterior a la nuestra, resurge bajo diferentes formas en el presente. (Es corriente, asimismo, en los Andes, que los ancestros—que son también los dioses de las montañas—se presenten a los humanos bajo una forma animal.) Ahora bien, hemos visto que el puma es también una suerte de descendiente de esta humanidad primordial: el narrador del mito precisa bien que antes era “como nosotros” (**nuqantsiknaw**), “como un hombre” (**nunanaw**). Y todavía hoy en día, en la quebrada, los campesinos lo perciben con rasgos netamente humanos. Luego, los dos personajes ocupan el mismo espacio, el mundo salvaje de la **hallqa**, que se aparenta al pasado. En los tiempos míticos, lo hemos visto, el puma fue relegado a esas tierras aisladas por la maldición divina, mientras que el abuelito fue aniquilado ahí por otro castigo, igualmente de origen celeste. Otra analogía: ambos hacen apariciones nocturnas para “comer”. Es de noche que el puma sale del bosque de quenuales, donde está confinado, para atacar a sus presas. Por su lado, el ancestro aparece—igualmente de noche—en los sueños de los hombres que se quedan en la **hallqa** (Walter 2003, 2002, 1994). Y si el puma—lo hemos visto—era y sigue siendo un temible devorador de hombres, es igualmente uno de los rasgos que caracterizan a los ancestros²⁷. Son de recordar los trabajos de Nash (1979), y los de Harris y Bouysse-Cassagne (1988), que muestran que devorar y ser devorado corresponden al mismo ámbito, el de la ancestralidad. Finalmente, aparece otra correspondencia en los términos para dirigirse entre sí. En el mito, los protagonistas se designan mutuamente con términos despectivos y profiriendo insultos sin cesar (¡cojudo, carajo!). Ahora bien, en otros relatos que ponen en escena específicamente encuentros entre el hombre y el abuelito, estos últimos se insultan con la misma virulencia. ¿Coincidencia? Pero hay algo más significativo: me ha sido relatado que, en la quebrada de Santa Cruz, distante de

²⁴Mi traducción. Ver igualmente Arnold (1992: 176).

²⁵Este episodio de la “maldición” del puma por Dios forma parte, en Huaraz, de un conjunto mítico más vasto, donde una gran cantidad de pájaros y de mamíferos fueron castigados por sus faltas respectivas (Walter 2003, 2002). Cf. Morote Best (1998), quien trata del tema de la maldición divina infligida a los pájaros.

²⁶No nos extenderemos sobre esta cuestión, que ha sido bien estudiada. Entre una literatura abundante, citemos a Wachtel (1990: 216), Salazar (1990: 290), Urbano (1993: 283), Cereceda (1990).

²⁷En la región de Huaraz, los abuelitos “devoran” los testículos de los hombres que los han agraviado. Además, las brujas Achikay, que, según algunos de mis informantes, son las mujeres de los abuelitos, devoraban antiguamente a los hombres y sobre todo a los niños (Walter, 2003, 2002).

Huaraz de unos cincuenta kilómetros, el puma es llamado simplemente “puma abuelo”²⁸.

Una vez establecido que el puma y el abuelito se confunden en el mismo personaje, el sentido del mito se vuelve más fácil de descifrar: el puma-abuelo, originario del lugar desde los tiempos antiguos, se opone al “otro”, un intruso venido de afuera. En efecto, el hombre penetra, sin haber sido invitado, en el territorio del puma-abuelo para extraer recursos, la madera de quenual. Precisemos que, según el decir de mis informantes, el quenual es un árbol que pertenece a los ancestros. Y según Ansion (1986: 77, 78), quien ha recogido datos etnográficos en una región contigua a la nuestra, el quenual es incluso asimilado directamente a los ancestros. ¿No debe uno, entonces, preguntarse, en la línea del análisis de Cereceda (1990), si el quenual no es también una reliquia de esta humanidad anterior? Por otro lado, el hombre que se introduce en este bosque posee una tecnología (el hacha), que el puma-abuelo ignora, pues en el tiempo de esta humanidad precultural que vivía de caza y de recolección no se dominaba las técnicas; se utilizaba instrumentos rudimentarios—la fuerza del puño. Admirativo de la superioridad tecnológica del hombre, el puma-abuelo sale a su encuentro con la idea de proceder a un intercambio de sus conocimientos respectivos. A pesar de grandes esfuerzos, el puma-abuelo fracasa en su intento de imitar al hombre. Observamos que el narrador insiste particularmente en el gesto del hombre, que parte la madera con un movimiento vertical, de arriba hacia abajo. En cambio, nos damos cuenta que el puma-abuelo, tomando impulso para golpear el tronco de frente con su puño, hace un movimiento horizontal. Regresaremos a esto más adelante. Luego, el hombre, que no manifiesta, por otro lado, ningún interés en aprender a utilizar la tecnología del puma, prepara su captura: da un hachazo en la **pallqa**, la horcadura del árbol. El puma-abuelo cae en la trampa: da, a su vez, un puñetazo en la **pallqa**. Su mano se queda inmovilizada ahí, y, sin poder defenderse, muere decapitado salvajemente.

A través de este encuentro con desenlace trágico, se reconocerá sin duda el conquistador español y el Indio—la mitología andina estando repleta de historias sobre este tema (Cf. Yauri Montero, 1993: 144 y siguientes). En cuanto al mensaje del mito, es el de una separación brutal entre los dos adversarios. Esta separación se encuentra aquí sumamente bien simbolizada por la imagen de la **pallqa**, esta horcadura en el árbol a partir de la cual dos ramas se separan. (Precisemos que el concepto de **pallqa** es lo contrario del de **tinku**, que expresa un movimiento de convergencia²⁹.) Ahora, veremos cómo esta interpretación se encuentra confirmada, por medio de un análisis comparativo.

2.4 El análisis comparativo

Si el método comparativo del análisis estructural de los mitos ha demostrado la unidad profunda del pensamiento amerindio (Lévi-Strauss), también se ha hecho aparecer—y con mayor razón—constantes muy notables en el seno mismo de la mitología andina. Ahora bien, al confrontar el relato del puma con dos mitos recogidos por N. Wachtel en Bolivia—uno de los Chipayas, el otro de los Urus del lago Poopó—parecería que hay ciertas similitudes entre

los tres relatos. Y ello, a pesar del alejamiento geográfico de Huaraz con respecto al área boliviana en cuestión. Los mitos bolivianos relatan el encuentro y el avasallamiento de los Chipayas y de los Urus Moratos por los Aymaras y los Españoles. Comparando en detalle estos dos mitos bolivianos, Wachtel (1990: 243-251) explica que, si bien “constan de temas que parecen, a primera vista, extraños uno para el otro” y bajo “aspectos diferentes”, “las secuencias se suceden paralelamente en las dos versiones, siguiendo el mismo esquema, pero no sin diferencias significativas” (1990: 246). Formulando las mismas reservas, nos parece que las secuencias del mito de Huaraz se desarrollan según un esquema muy similar al de los mitos bolivianos. Pero a fin de no extendernos demasiado sobre esta cuestión, solo retendremos aquí el mito chipaya.

En resumen, este mito explica cómo los Chullpas, seres venidos de la humanidad anterior y ancestros de los Chipayas, se refugiaron en un lago a fin de escapar al incendio primordial. Más tarde llegaron los Aymaras, quienes emprendieron la construcción de una torre en Sabaya. Los Chullpas salían del lago en la noche, y decidieron ayudar secretamente a los Aymaras. Estos, intrigados al ver los muros elevarse por sí solos, se pusieron a vigilar. Sorprendieron a los Chullpas, e intentaron atraparlos con trampas. Se apoderaron de uno de ellos, pero éste no comprendía su lenguaje. Interrogado sobre su proveniencia, indicó el este. Los Aymaras lo ataron a una cuerda y se hicieron conducir al lago, donde capturaron (pescaron) a todos los Chullpas. Luego, los Aymaras bautizaron a sus prisioneros. Les dieron nombres y un territorio. Posteriormente, los Chipayas fueron desalojados y expulsados a sus tierras actuales (Wachtel, 1990: 220-221).

Es así que el mito chipaya y el de Huaraz hacen intervenir temas comunes: el encuentro, el engaño y la captura. Mientras que el mito de Huaraz es “intemporal”, el mito chipaya establece claramente la identidad de los protagonistas, y da además precisiones de orden geográfico e histórico. En el cuadro siguiente, veremos que a pesar de inversiones y episodios suplementarios contenidos en el mito chipaya, las secuencias se suceden de manera prácticamente paralela. (El mito chipaya culmina, no obstante, en una conclusión más matizada que el mito de Huaraz.)

Sin entrar en un análisis comparativo detallado, siguen algunos comentarios sobre las secuencias 5, 6 y 8, que nos llaman particularmente la atención. En efecto, primero que todo podemos constatar que ahí donde el mito de Huaraz diferencia al hombre y al puma-abuelo mediante la tecnología, el mito chipaya pone en juego la diferencia lingüística: los Chullpas no hablan aymara y los Aymaras no hablan puquina (secuencia 5). Luego, encontramos en los dos mitos el movimiento horizontal (secuencia 6) y vertical (secuencia 8). En la secuencia 6, el puma-abuelo golpea los árboles de frente, mientras que el Chullpa se expresa con un gesto que indica el este. En la secuencia 8, el invasor español efectúa un movimiento de arriba hacia abajo para decapitar al puma, mientras que los Aymaras hacen lo mismo para pescar a los Chullpas del lago. Debemos entonces preguntarnos si el hecho de encontrar estas dos series de movimientos en los dos mitos (e incluso en el

²⁸Comunicación personal, Daniel Maldonado.

²⁹Para un análisis más detallado de estos conceptos, ver Earls y Silverblatt (1978).

tercer mito³⁰) es un azar o si posee un significado particular. La insistencia puesta por el narrador del mito de Huaraz en la diferencia entre los gestos del puma-abuelo y del hombre tiende a hacernos pensar que tienen una importancia. Pero entonces, ¿cuál sería el significado de estos movimientos? Hasta que profundicemos esta pregunta, solo sugeriremos que el gesto horizontal, efectuado por los ancestros “abuelos” y los Chullpas durante su encuentro con los recién llegados, expresaría su intención de establecer relaciones sobre bases igualitarias y de reciprocidad. En cambio, el movimiento de arriba hacia abajo, utilizado por los invasores, simbolizaría su voluntad de sometimiento brutal de las poblaciones encontradas y la instauración de vínculos de subordinación³¹.

Mito de Huaraz	Mito Chipaya (según Wachtel, 1990: 249)
1. El puma-abuelo está escondido dentro del bosque.	1. Los Chullpas están escondidos dentro del lago.
2. El puma-abuelo ve al hombre que trabaja.	2. Los Aymaras ven los rastros del trabajo de los Chullpas.
3. El puma-abuelo acecha al hombre.	3. Los Aymaras se ponen a vigilar.
4. El puma-abuelo va al encuentro del hombre.	4. Los Aymaras capturan a un Chullpa.
5. El puma-abuelo no utiliza la misma tecnología que el hombre.	5. El Chullpa no habla el mismo idioma que los Aymaras.
6. El puma-abuelo, con su puño, golpea el tronco con un movimiento horizontal.	6. Con su gesto, el Chullpa muestra el este (movimiento horizontal).
7. El hombre tiende una trampa al puma-abuelo.	7. El Chullpa, bajo coacción, conduce a los Aymaras al lago.
8. El puma-abuelo es masacrado con un hacha (movimiento de arriba hacia abajo).	8. Los Chullpas son "pescados" (movimiento de arriba hacia abajo).
9. Mensaje: disyunción total.	9. Los Chullpas son convertidos a la cristiandad.
	10. Mensaje: conjunción en una relación de subordinación.

En definitiva, estos mitos corresponden a un mismo esquema dualista y temporal, que permite situar a un grupo humano con respecto a otro que sería anterior a él: el puma-abuelo y el chullpa, ambos provenientes de los tiempos preculturales, se oponen a recién llegados—los Españoles o los Aymaras—que pertenecen a los tiempos presentes. En *Historia de Lince* (1991), C. Lévi-Strauss ha revelado lo que se puede llamar una constante del pensamiento amerindio, del cual nuestros mitos formarían parte. En efecto, él ha mostrado cómo la organización progresiva del mundo y de la sociedad se ordena, a través de la mitología, mediante biparticiones sucesivas donde los términos (seres, elementos o grupos sociales) nunca son iguales. Uno siempre es superior al otro. Y concluye de ello que ese “dualismo en perpetuo desequilibrio”, proceso dinámico que impide que el sistema caiga en inercia, es el garante del buen funcionamiento del universo.

Regresemos, ahora, a las quebradas por encima de Huaraz. Bajo la iluminación del mito, los discursos de los campesinos que relatan sus encuentros con el puma se cargan con un nuevo significado. Tenemos la impresión,

de cierta manera, que el mito sigue ocurriendo. El comportamiento “extraño” del puma y su agresividad se vuelven comprensibles: animado por el rencor del fracaso y del engaño del pasado, el puma-abuelo se empeña todavía en sacudir los árboles, al fondo de los bosques, para lograr romperlos; y cuando el campesino penetra en las quebradas—últimos bastiones de la naturaleza salvaje—el puma-abuelo se esfuerza a toda costa de expulsar al intruso fuera de su territorio. Aperchado encima de las rocas, en los flancos abruptos—y esta vez con un movimiento de arriba hacia abajo!—el puma hace precipitarse bloques de piedra. En cuanto a los campesinos, recordemos la expedición que llevaron a cabo contra el puma en la quebrada de Cojup, armados con cohetes. ¿No se parecen, en cierta forma, a los invasores españoles con sus fusiles? Para convencerse de ello, basta con recordar el significado de los cohetes en las fiestas de pueblo en la región—aun si hoy en día los pobladores ya no tienen consciencia de ello en absoluto. En uno de los momentos culminantes de la fiesta, los “capitanes”, seguidos por su escolta, entran triunfalmente en la plaza del pueblo haciendo explotar cientos de cohetes, mientras que la muchedumbre los recibe atacándoles con caramelos. Se trata—según cuentan en otros pueblos de la región³²—de una representación de la llegada de los Españoles, disparando con sus fusiles, y de su encuentro con los “Incas”, lanzando piedras. Así, a través de todos los relatos de puma que no cesan de contarse, y los acontecimientos, se constata una sorprendente vitalidad del mito. Los dos mundos del pasado y del presente siguen confrontándose, día tras día, dentro de las quebradas.

Nos queda ver todavía cómo el mito clarifica la práctica simbólica.

3. PRÁCTICAS VINCULADAS AL USO DE LA GRASA DE PUMA

En cuanto uno tiene conocimiento del mito, una práctica—que consiste en frotarse el cuerpo con grasa de puma—así como un rito de paso al momento de la muerte, se vuelven inteligibles.

Antes de describir estas prácticas, recordemos brevemente que el tema de la grasa, en los Andes, ha llamado la atención de los investigadores. Si la grasa (generalmente la de la llama) es un elemento importante de las ofrendas a las divinidades, también se utiliza en el ámbito de la brujería (Molinié, 1991: 82). Por otro lado, se ha estudiado mucho la representación simbólica de la grasa, en particular a través de la creencia en el **pishtaco**, el sacador de grasa humana³³. Considerada como fuente de la vitalidad, la grasa forma parte, desde los tiempos antiguos, de un circuito de intercambio de energía entre los vivos y los muertos. Sin embargo, no parece que se haya hecho mención, hasta el presente, del uso de la grasa de puma.

3.1 Los efectos de la grasa de puma

Según una creencia ampliamente difundida en la región de Huaraz, los hombres que se han friccionado las manos y la parte baja de la espalda con grasa de puma, adquieren

³⁰ Cf. El mito de los Urus Moratos (Wachtel, 1990: 244, 247).

³¹ Th. Bouysse-Cassagne (1978: 1069, 1071) da un ejemplo donde la verticalidad y la horizontalidad, inscritas en tejidos, tienen un significado simbólico muy preciso: lo vertical corresponde a lo alto y lo masculino; lo horizontal a lo bajo y lo femenino.

³² Cf. Burga Díaz (1987) a propósito de la fiesta de Santa Rosa, en Chiquián (departamento de Ancash).

³³ Cf. Boletín del I.F.E.A. 1991, 20(1), dedicado en gran parte al tema del **pishtaco**.

para toda la vida una fuerza fuera de lo común. Como en el mito, esta fuerza se concentra en particular en el puño:

RL: [...] *Hayshi kutaykushqa, anchakar aywakuyan.*

RL: [...] Entonces, cuando nosotros damos un puñetazo [a nuestros adversarios], se caen [hacia atrás] abriendo las piernas.

Al ingerir el corazón o la sangre del puma, los efectos son aún más potentes³⁴:

AL: *Haypa yawarninta shunqunta mikukurkurqa, manash wanuntsiqtsu. Pasaypa pumawampis igwal igwalshi peleyakuykuntsikpis.*

AL: Si comemos su sangre y su corazón, no morimos. Totalmente a igualdad con el puma, nos peleamos.

En este último fragmento, nuestro informante precisa que el consumo de la carne de puma “impide” morir. Es lo mismo en cuanto a su grasa, que confiere a aquellos que la han utilizado (algunos dicen “comido”), una longevidad de vida y una resistencia excepcionales: uno de mis informadores citó el caso de su abuelo, que murió a la edad de 120 años, sin haber estado enfermo nunca y sin haber conocido el dolor físico. ¿Qué representa esta grasa de puma? ¿Cuál es su función simbólica? Vemos que el hombre se vuelve de cierta manera “tal como” el puma (que tiene siete vidas); o también “tal como” el abuelito, que poseía él también una gran fuerza y vivía hasta una edad muy avanzada. Por las cualidades que confiere, la grasa constituye una materialización de los poderes particulares del animal, y, consecuentemente, de los ancestros y de los muertos. Ahora bien, sabemos que antiguamente los ancestros eran considerados como investidos de una fuerza vital animante, el *camac*, que garantizaba la fecundidad y la reproducción (Taylor, 1974-1976). El hecho de ungir el cuerpo con esta grasa—como si uno se revistiera con una piel—o incluso tragarla, ¿no tiene por objeto, a fin de cuentas, de transferir al hombre la fuerza animante del *camac*?

Aunque por una lógica diferente, coincidimos con la simbología del puma puesta en evidencia por Urton (1985: 251) en Pacariqtambo, en el departamento de Cusco. En esta comunidad, el hombre sigue un derrotero metafórico que lo conduce a ser comparado, durante las diferentes etapas de su vida, a una serie de animales: como adolescente, es comparado metafóricamente al oso; como recién casado, al zorro; y cuando ha alcanzado la edad madura y asumido responsabilidades rituales y políticas en el seno de la comunidad, al puma.

Durante la edad madura, el hombre que se ha sobado con la grasa del puma, aprovecha las cualidades de fuerza y resistencia del felino. En cambio, en el momento de la vejez, soporta los inconvenientes. Pues, al lado de sus propiedades positivas, la grasa de puma tiene consecuencias muy temidas³⁵. Se dice, en efecto, que a imagen del viejo felino que “ronca” y se arrastra de manera miserable, el anciano, jadeando y sin fuerzas, no llega a morir. Es así que, por temor de exponerse a sufrimientos prolongados en su vejez, ninguno de mis informantes se ha arriesgado jamás a utilizar la grasa de puma.

3.2 El simulacro de la “matanza”

A fin de facilitar al anciano el paso a la muerte, sus allegados recurren a un simulacro:

RL: (...) *Wanukunampaq iskatsiyarqaa. Ni wanuqtsu. Ronkaq tuurunaw. Después qirutarayq walluyarqaa. Hayta walluriyaptii, yasta, wanurirqa.*

RL: (...) Para que muera, lo hemos recostado. Seguía sin morirse. Roncaba como un toro. Luego, cortamos más madera. Una vez que la cortamos —¡ya está!— se murió.

La escena se desarrolla de la manera siguiente. Hacen recostar al anciano en el suelo en la casa. Luego colocan un tronco de árbol a su costado, paralelo al cuerpo. (Aparentemente, el tipo de madera utilizado importa poco.) Después de haber afilado bien la hoja de un hacha sobre una piedra, pasan el hacha por encima del cuello del yacente con un gesto que imita el de cortar el cuello. Luego, el ejecutante eleva el hacha en el aire y con un gesto seco parte el tronco longitudinalmente. En ese momento, se supone que el agonizante expira.

La puesta en escena es a veces más elaborada. Una mujer me relató cómo “acabaron” con su suegro que hacía semanas que no terminaba de morirse:

NM: *Difunto Tomás Huayanayta haynawran wanutsiyarqaa ardaypa haachawan mutuypañawna. Manam wanukuyta yachantsiktsu. Uqshapa llapan qaranta pitsariykurran, waqtaman hurqariykur, ninata sendiyarqaa. Chuskun eskina wayipitaran “waw! waw! waw!” nishpa qayayarqaa. Haynawpa tukuynawran wanutsiyarqaa. Manam wanukuyta yachantsiktsu. Hayshi pumapa wiranta maa mikushqa kanaq.*

NM: Nosotros hicimos morir así al difunto Tomás Huayanay, fingiendo que le cortábamos [el cuello] con un hacha. No se decide morir³⁶. Barriendo además toda su piel con [un puñado de] *uqsha*, sacándola afuera, le prendimos fuego. Desde las cuatro esquinas de la casa gritamos “¡waw! ¡waw! ¡waw!”. De todas estas formas, de todo tipo de formas, lo hicimos morir. No se decide morir. Dicen que ese [hombre] había comido grasa de puma.

¡Imaginemos los efectos visuales y auditivos que se agregan a la tensión dramática que precede el momento de la muerte! Un miembro de la familia “barre” el cuerpo del agonizante con un puñado de gramíneas, les prende fuego, y lleva la paja en llamas afuera de la casa. El anciano se pone a “rugir”, mientras que el resto de la familia le responde, “rugiendo” desde las cuatro esquinas de la casa³⁷.

Estamos aquí en presencia de un rito de paso que actualiza el mito. Gracias a éste, el significado del gesto de partir el tronco con el hacha puede comprenderse: el mismo hachazo que mató al puma hace morir al anciano. ¿Y por qué el fuego? Mis informantes siempre han insistido en el hecho que el puma tiene un terrible temor al fuego. Ellos deducen, además, este estado de cosas directamente del mito, sin poder dar la razón. (Obsérvese que el manejo del fuego por el hombre está contenido implícitamente en nuestro mito

³⁴ Zuidema relata prácticas similares en la región de Ayacucho: se bebe la sangre del puma y su carne se consume para adquirir fuerza (1985: 193).

³⁵ Se constata que la misma ambivalencia con la cual los campesinos perciben al animal recae sobre las propiedades de la grasa.

³⁶ Literalmente, “no sabemos morir”.

³⁷ Cuando NM, en otra ocasión, describe de nuevo la escena de los rugidos, ella dice claramente: “*Pumanawmi waw! waw! niq. Haymi yaskiyay kayaa wayi eskinapita. (...)*”. “Como el puma, [el viejo] decía ¡waw! ¡waw! Por eso, nosotros le respondíamos desde las esquinas de la casa (...)”.

por el hecho que el hombre había subido al bosque para fabricar carbón de madera). Solo podemos sugerir que, así como el fuego hace huir al puma, contribuye a expulsar al agonizante al otro mundo. Finalmente, el último punto que llama nuestra atención es el de los gritos emitidos por el moribundo y los miembros de su familia. Los ronquidos y los rugidos del anciano, que se aparentan al estertor de la muerte, indicarían que, convertido verdaderamente en puma, está listo para pasar de la domesticidad de los vivos a la animalidad salvaje de los muertos. Por su lado, los rugidos de sus descendientes, posicionados en las cuatro esquinas de la casa³⁸, señalarían que ya se aprestan a convertirse en los futuros ancestros.

En resumen, mientras más se acerca el anciano a la muerte, más se vuelve como el puma. Y para hacerlo morir, se recurre a los mismos actos que los que hacen morir al puma. A partir de ejemplos tomados en diferentes culturas sud-americanas, Isbell (1985: 306) concluye que el proceso metafórico que utiliza una imagería animal se pone en práctica esencialmente en los momentos de transición importantes en la vida de un individuo: el paso del nacimiento a la infancia, el de la infancia a la adolescencia, luego la entrada a la edad adulta, etc. Constatamos que el anciano –al que se debe ayudar a dar el paso de la muerte, como si fuera puma– es una ilustración suplementaria de ello.

4. CONCLUSIÓN

Todos los relatos, prácticas y comportamientos de los campesinos con respecto al puma, así como las emociones que éste suscita, permiten entrever que la simbólica de este animal procede de un universo complejo y bien vivo. ¿Cuál es, en definitiva, la imagen del puma que surge de estas páginas? En realidad, es múltiple. Si el puma corresponde al abuelito, este ancestro del pasado, aparece también como una metáfora del anciano, el abuelo del tiempo presente. Tratemos, por otro lado, de colocar las diferentes imágenes del puma en una perspectiva diacrónica. En los tiempos míticos, su estatus, así como su apariencia, eran equivalentes a los del hombre. Recordemos, en efecto, que según los términos utilizados por mi informante, era “como el hombre” (nunanaw). En un momento dado (que coincide sin duda con el del trauma de la Conquista), se encuentra con otro grupo humano que lo domina, decapitándolo. Paralelamente, sufre la condenación divina, es despojado de su estatus igualitario con el hombre, y se vuelve “como un perro” (allqunaw). Hoy, se le percibe como una suerte de “reliquia” del bosque. Sus representantes, una o dos familias, ya no se reproducen. De la misma manera, los hallqa nuna³⁹, últimos descendientes de los abuelitos y últimos ancianos que han utilizado la grasa de puma, están también destinados a desaparecer, a pesar de que sean lentos en morir.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a Thérèse Bouysse-Cassagne y a César Itier, quienes han tenido la gentileza de leer este manuscrito y cuyos consejos y sugerencias me han sido muy útiles. En cuanto a la presente versión en castellano, agradezco

a Alex Abril de Vivero por su trabajo de traducción, y a Félix Julca Guerrero por su revisión de las transcripciones en quechua. Quiero mencionar también a Steven Wegner, cuyas observaciones atinadas han sido muy importantes en la finalización editorial del manuscrito.

FUENTES ORALES

- JF, Julián Flores, agricultor, más de 80 años, Unchus.
 RL, Rigoberto Lliuya, agricultor, 56 años, Llupa.
 MS, Modesto Sánchez, agricultor, más de 80 años, Collón.
 AL, Alejandro Lliuya, 12 años, Llupa.
 VH, Valerio Huané, agricultor, más de 80 años, Unchus.
 NM, Nieves Milla, 55 años, Llupa.
 MC, Magno Camones, 36 años, guía de alta montaña, Huaraz.

REFERENCIAS

- Albó, X. y Equipo de CIPCA. (1972). Dinámica en la estructura inter-comunitaria de Jesús de Machaca. *América Indígena*, 32(3), 773-816. Méjico.
- Ansión, J. (1986). *El árbol y el bosque en la sociedad andina*. Lima, Ministerio de Agricultura / FAO.
- Arnold, D. (Coord.). (1992). *Hacia un orden andino de las cosas: tres pistas de los Andes meridionales*. La Paz, Hisbol / ILCA.
- Bouysse-Cassagne, T. (1978). L'espace aymara: *urco* et *uma*. (El espacio aymara: *urco* y *uma*). *Annales. Economies, Sociétés, Civilisations*, 33(5-6), 1057-1079. París.
- Burga Díaz, M. (1987). *The transformation of the Andean rituals: the Andean utopia at the crossroads*. Latin American Program, Working papers 175. Washington, The Wilson Center.
- Cereceda, V. (1990). A partir de los colores de un pájaro... *Boletín del Museo Chileno de Arte Precolombino*, 4, 57-104. Santiago.
- Earls, J. y Silverblatt, I. (1976). La realidad física y social en la cosmología Andina. En *Actes du XLII Congrès International des Américanistes*, 4, 299-325. París.
- Harris, O. y Bouysse-Cassagne, T. (1988). Pacha: En torno al pensamiento Aymara. En Albó, X. (Comp.). *Raíces de América: El Mundo Aymara*, 217-281. Madrid, Alianza Editorial/UNESCO.
- Isbell, B. J. (1985). The metaphoric process: from culture to nature and back again. En Urton, G. (Ed.). *Animal myths and metaphors in South America*, 285-313. Salt Lake City, University of Utah Press.

³⁸ La importancia ritual de las esquinas ha sido subrayada por Platt (1978: 1103).

³⁹ El término **hallqa nuna**, que es hoy en día un término peyorativo, se refiere a los habitantes de la **hallqa**, es decir los últimos Indios en respetar las costumbres antiguas.

- Levi-Strauss, C. (1991). *Histoire de Lynx* (Historia de Lince). París, Plon.
- Julca Guerrero, F. (2009). *Quechua ancashino. Una mirada actual*. Lima, CARE-Perú / Fondo Editorial del Pedagógico San Marcos.
- Molinié Fioravanti, A. (1991). Sebo bueno, indio muerto: La estructura de una creencia andina. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 20(1), 79-92.
- Morote Best, E. (1988). Las aves que engañaron a dios. En *Aldeas sumergidas, cultura popular y sociedad en los Andes*, 101-109. Cusco, Centro Bartolomé de las Casas.
- Nash, J. (1979). *We eat the mines and the mines eat us: Dependency and exploitation in Bolivian tin mines*. New York, Columbia University Press.
- Platt, T. (1978). Symétries en miroir: Le concept de yanantin chez les Macha de Bolivie (Simetrías en espejo: El concepto de yanantin para los Machas de Bolivia). *Annales: Economies, Sociétés, Civilisations*, 33(5-6), 1081-1107. París.
- Salazar-Soler, C. (1990). *Pratiques et croyances religieuses des paysans et des mineurs à Huancavelica (Andes péruviennes)* (Prácticas y creencias religiosas de los campesinos y los mineros en Huancavelica – Andes peruanos). Tesis de Doctorado en Etnología, EHESS, París.
- Taylor, G. (1974). *Camay, camac et camasca dans le manuscrit de Huarochiri*. *Journal de la Société des Américanistes*, 63(1), 231-244. París.
- Taylor, G. (1987). *Ritos y tradiciones de Huarochiri. Manuscrito quechua de comienzos del siglo XVII*. Versión paleográfica, interpretación fonológica y traducción al castellano de Gerald Taylor. Lima, Instituto de Estudios Peruanos / Instituto Francés de Estudios Andinos.
- Turner, T. (1985). Animal symbolism, totemism and the structure of myth. En Urton, G. (Ed.). *Animal myths and metaphors in South America*, 49-106. Salt Lake City, University of Utah Press.
- Urbano, H. (1993). Las tres edades del mundo: La idea de utopía y de historia en los Andes. En Urbano, H. (Comp.). *Mito y simbolismo en los Andes: La figura y la palabra*, 283-304. Cusco: Centro de Estudios Regionales Andinos “Bartolomé de las Casas”.
- Urton, G. (1985). Animal metaphors and the life cycle in an Andean community. En Urton, G. (Ed.). *Animal myths and metaphors in South America*, 251-284. Salt Lake City, University of Utah Press.
- Wachtel, N. (1990). *Le retour des ancêtres* (El retorno de los ancestros). *Les indiens Urus de Bolivie XXe-XVIIe siècles. Essai d'histoire régressive*. París, Éditions Gallimard.
- Walter, D. (1994). *Le rôle de la montagne dans l'imaginaire des paysans de la région de Huaraz (Pérou)* (El rol de la montaña en el imaginario de los campesinos de la región de Huaraz, Perú). Memoria de D.E.A., París, I.H.E.A.L.
- Walter, D. (2002). *L'alpiniste, le paysan et le Parc National du Huascarán: la domestication de la nature sauvage dans les Andes péruviennes* (El alpinista, el campesino y el Parque Nacional Huascarán : La domesticación de la naturaleza salvaje en los Andes peruanos). Tesis doctoral. París: IHEAL, Université de Paris III.
- Walter, D. (2003). *La domestication de la nature dans les Andes péruviennes: L'alpiniste, le paysan et le Parc National du Huascarán* (La domesticación de la naturaleza en los Andes peruanos: El alpinista, el campesino y el Parque Nacional Huascarán). París, Editions L'Harmattan.
- Yauri Montero, M. (1990). *Leyendas ancashinas: plantas alimenticias y literatura oral andina*. Lima, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Yauri Montero, M. (1993). *El Señor de la Soledad de Huarás. Discursos de la abundancia y carencia. Resistencia andina*. Lima, Editorial Ave.
- Zuidema, R. T. (1985). The lion in the city: Royal symbols of transition in Cuzco. En Urton, G. (Ed.). *Animal myths and metaphors in South America*, 183-250. Salt Lake City, University of Utah Press.

BOSQUES DE *POLYLEPIS* COMO BANCOS GENÉTICOS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LOS ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Polylepis Forests as Genetic Banks for the Ecological Restoration of Mountain Ecosystems

David Ocaña Vidal¹ y O. Jesús Santander²

¹Director de Investigación en Ecosistemas de Montaña - INAIGEM

²Consultor del INAIGEM

RESUMEN

Actualmente, a altitudes por encima de los 3.000 a 3.500 m, la vegetación de los Andes centrales está dominada por zonas agrícolas, pastizales y zonas arbustivas. Los árboles son escasos y están mayormente representados por especies introducidas de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. Los bosques naturales son escasos y están comúnmente restringidos a localidades especiales, como laderas rocosas o quebradas. Estos relictos de bosque son dominados por especies del género *Polylepis*, aunque en la mayoría de estos bosques están presentes otras especies leñosas como *Buddleja*, *Clethra*, *Gynoxys*, *Podocarpus* o *Prumnopitys*. Estos bosques representan uno de los ecosistemas más amenazados del mundo, pero al mismo tiempo cumplen un rol central en la ecología altoandina, como hábitat de muchas especies de plantas y animales, permitiendo conservar la biodiversidad, que a su vez es importante fuente de recursos para los habitantes locales.

El género *Polylepis* se distribuye a lo largo de la Cordillera de los Andes, desde el norte de Venezuela en el estado de Lara hasta Tarapacá en Chile y Córdoba en la Argentina. Estos bosques relictos constituyen ecosistemas únicos para estas regiones y son prueba saltante de que antiguamente han cubierto gran parte de la región alta de los Andes. En la Región Ancash, especialmente en el Parque Nacional Huascarán, estos bosques en la actualidad vienen soportando una gran presión por parte de los habitantes de las comunidades campesinas aledañas, ya que constituyen su principal fuente energética. Además del uso del suelo para la actividad agrícola (los habitantes “aperturan” áreas dentro y al borde de los bosques), otra actividad negativa es el sobre pastoreo (ganado ovino, vacuno, caprino y equino), que no permite que el bosque se regenere naturalmente.

Estas actividades desestabilizan el sistema natural y generan un peligroso desequilibrio ecológico que expone a los bosques a su posible exterminación. Esta desaparición no solo implicaría la pérdida de un gran número de especies de flora, sino que también afectaría a las poblaciones de fauna, especialmente a las aves, las cuales tienen a estos bosques como lugar de alimentación, descanso y reproducción. Asimismo, es importante el papel que cumplen los bosques en la protección de las cuencas contra los procesos erosivos y de regulación hídrica.

Palabras clave: Perú, Andes, Parque Nacional Huascarán, bosque, *Polylepis*

ABSTRACT

Currently, at altitudes above 3,000 to 3,500 m, the vegetation of the Central Andes is dominated by agricultural areas, grasslands and shrub areas. Trees are scarce and are mostly represented by introduced species like *Eucalyptus* and *Pinus*. Natural forests are rare and are commonly restricted to special localities, such as rocky slopes or ravines. These relict forest are dominated by species of the genus *Polylepis*, although in most such forests other species are present, such as *Buddleja*, *Clethra*, *Gynoxys*, *Podocarpus* or *Prumnopitys*. These forests represent one of the most threatened ecosystems in the world, but at the same time play a central role in high Andean ecology as habitat for many species of plants and animals, thus conserving biodiversity.

Polylepis is distributed throughout the Andes, from northern Venezuela in the state of Lara to Tarapacá in Chile and Cordoba in Argentina. These forests are unique ecosystems for these regions and probably covered much of the high Andes in the past. In the Ancash Region, especially in the Huascarán National Park, these forests are currently under great pressure from the inhabitants of the peasant communities surrounding them, since the forests are their main energy source. Besides using the land for agricultural activity by opening areas inside and at the edge of the forests, another negative activity is overgrazing by livestock (cattle, sheep, goats and horses), which does not allow the forest to regenerate naturally.

These activities destabilize the natural balance and generate a dangerous ecological imbalance, which exposes the forests to possible extermination. This would not only involve the loss of a large number of flora species, but would also affect wildlife populations, especially birds, which use these forests for feeding, resting and breeding. In addition, the forests play a role in water regulation and in the protection of watersheds against erosive processes.

Keywords: Peru, Andes, Huascarán National Park, forest, *Polylepis*

TAXONOMÍA Y EVOLUCIÓN DEL GÉNERO *POLYLEPIS*

El género *Polylepis* pertenece a la tribu Sanguisorbeae de la familia Rosaceae, que se caracteriza por una polinización anemófila y por sus frutos secos (Kessler, 1995b). *Polylepis* incluye entre 15 y 28 especies (Bitter, 1911; Simpson, 1979; Kessler, 1995a; Kessler y Schmidt-Lebuhn, 2005), en su mayoría árboles de 5-10 m de altura, pero también con algunas especies comúnmente arbustivas (*P. microphylla*, *P. pepeii*, *P. tarapacana*, *P. tomentella* subsp. *nana*) y otras que llegan a superar los 25 m (*P. lanata*, *P. pauti*). Los análisis filogenéticos sugieren que *Polylepis* se desarrolló mediante poliploidización desde el género arbustivo y herbáceo *Acaena* (Kerr, 2003) y que las especies filogenéticamente basales de *Polylepis* fueron árboles con hojas delgadas, 7-11 foliolos por hoja, corteza delgada e inflorescencias con abundantes flores (hasta más de 70) (Simpson, 1986; Kerr, 2003; Schmidt-Lebuhn, Kessler y Kumar, 2006). La subsiguiente evolución del género fue en dirección a especies con hojas más gruesas, reducción del número de foliolos, desarrollo de una corteza más gruesa e inflorescencias reducidas con pocas flores. Todas estas son adaptaciones a los hábitats fríos y áridos de los altos Andes. Aunque no hay registros, la orogenia andina relativamente reciente y la baja diferenciación genética de las especies sugieren que la evolución del género ha ocurrido en los últimos millones de años (Simpson, 1986; Kessler, 1995a; Kerr, 2003; Schmidt-Lebuhn, Kessler y Kumar, 2006). Es muy probable, que la evolución del género haya sido dominada por las marcadas fluctuaciones climáticas durante el período pleistocénico, forzando a las especies a migrar repetidamente a localidades con condiciones ecológicas favorables, así como fragmentando las distribuciones de especies (Fjeldsá, 1995; Kessler, 1995a).

ECOLOGÍA DE LOS BOSQUES DE *POLYLEPIS*

Las condiciones ecológicas de los bosques de *Polylepis* se pueden caracterizar principalmente en relación a condiciones de temperatura, humedad y suelos. Debido a su localización en grandes elevaciones en los Andes, los bosques de *Polylepis* están sujetos a amplias fluctuaciones diurnas de temperatura, comúnmente con diferencias de 20-30°C entre las temperaturas máximas del día y las heladas nocturnas (Figura 1). Estas fluctuaciones representan un estrés enorme para las plantas. Sobre todo, a altitudes por encima de los 4.000 m, la gran mayoría de las especies muestra adaptaciones a temperaturas bajas. Estas pueden ser morfológicas como las gruesas cortezas de *Polylepis* y el crecimiento en cojines en *Azorella*, o fisiológicas como la resistencia al congelamiento que también se observa en *Polylepis* (Goldstein, Meinzer y Rada, 1994; Körner, 1999; Hoch y Körner, 2005). Las condiciones semiáridas a áridas de gran parte de los bosques de *Polylepis* también conllevan a adaptaciones especiales de las plantas. En la época seca, que coincide con la época relativamente más fría, muchas plantas se encuentran en estados inactivos, sobreviviendo como semillas (plantas anuales), bulbos o rizomas subterráneos (geófitos, incluyendo especies de *Solanum*, *Oxalis*, *Ullucus* y *Tropaeolum*) o al menos no mostrando crecimiento (muchos arbustos). Las plantas suculentas son raras en bosques de *Polylepis*, ya que las amplias reservas de agua de éstas son muy susceptibles al congelamiento. En

el caso de *Polylepis*, el crecimiento vegetativo tiene lugar sobre todo en la época húmeda y relativamente caliente, mientras que la floración ocurre principalmente en la época seca y fría (Kessler y Schmidt-Lebuhn, 2005).

Esto probablemente es una adaptación a una eficiente polinización por viento en la época seca y tiene efectos en las semillas que llegan a estar maduras al comienzo de la época de lluvias para aprovechar al máximo las condiciones favorables. Muchas especies de arbustos y hierbas también florecen en la época seca, aunque el máximo de floración es claramente en la época húmeda. Las adaptaciones de las plantas a condiciones climáticas extremas desde luego son más importantes en bosques localizados en altas elevaciones y en zonas secas, mientras que están menos afectados los bosques a elevaciones menores y con mayor humedad. Además de las condiciones climáticas, en muchas zonas altoandinas existen condiciones de suelo desfavorables debido a que las bajas temperaturas y la aridez limitan la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de nutrientes. Sobre todo nitrógeno y fósforo parecen ser los factores limitantes para el desarrollo de las plantas (Beck y Ellenberg 1977; Geyger, 1985). En combinación con las especies de plantas en los bosques de *Polylepis*, incluyendo las ramas de los mismos árboles, son consideradas como plantas forrajeras de alto valor, mientras que muchas especies de los pastizales aledaños son consumidas por el ganado, pero son de baja calidad nutricional.

Es muy frecuente observar parches de bosques de *Polylepis* (Figura 2) en zonas de derrumbe con abundantes piedras de gran tamaño (Figura 3). Estas áreas generan condiciones favorables para que se dé la regeneración natural, entre ellas, dificultades para que ingrese el ganado y pueda ramonear; además de acumulación de calor en las piedras, mejorando las condiciones de temperatura, suelo removido que mejora la infiltración del agua, facilitando la germinación y enraizamiento. En estas condiciones, se aprecia un buen crecimiento, la repoblación que se genera con estos árboles brinda condiciones favorables para el desarrollo de otras especies arbustivas.

ALTERNATIVAS PARA LA RECUPERACIÓN DE BOSQUES DE *POLYLEPIS*

Ecológicamente, el papel de estos bosques es funcionar como depósitos de agua, almacenando una gran cantidad de humedad proveniente de la lluvia y de las densas nieblas a las que están sometidos. Sin embargo, existen lugares donde la precipitación y la niebla son escasas, en esta situación el bosque depende de la humedad disponible en el período de lluvias y eventualmente de acuíferos. Otro papel que desempeñan estos bosques es también el de protección del suelo contra el proceso de la erosión.

Como se menciona líneas arriba, si bien el *Polylepis* es el género más abundante y representativo de estos bosques, en la mayoría de casos están presentes otras especies leñosas como *Buddleja*, *Clethra*, *Gynoxys*, *Podocarpus* o *Prumnopitys*. En tal sentido, de pretender recuperar estos ecosistemas utilizando las distintas técnicas de producción forestal, debemos empezar por entender que representan una miscelánea de especies leñosas a considerar. Al entender cómo están distribuidas estas especies en los



Figura 1. Bosque de *Polylepis* sp., Quebrada Llaca - Ancash. Foto: D. Ocaña Vidal.



Figura 2. Bosque de *Polylepis* sp., Quebrada Cojup - Ancash. Foto: D. Ocaña Vidal.



Figura 3. Bosque de *Polylepis* sp., Quebrada Cojup – Ancash. Foto: D. Ocaña Vidal.



Figura 4. Bosque de *Polylepis* sp., Quebrada Llaca – Ancash. Foto Foto: D. Ocaña Vidal.

distintos bosques nativos y en qué proporción, se pueden iniciar los trabajos de reforestación y restauración natural de los mismos. Entonces y sólo entonces, podremos hablar de una efectiva y eficaz forma de recuperar los ecosistemas andinos.

En la actualidad, en el Perú se realiza la reforestación básicamente con el *Polylepis incana* y *Polylepis racemosa*, porque son las que tiene un mejor comportamiento en términos de crecimiento rápido, comparativamente a las otras especies, así como de fácil propagación vegetativa; asimismo, existe una marcada preferencia del campesino por tener fuste más recto con relación a las otras especies de *Polylepis*.

El Instituto Nacional de Investigación en Ecosistemas de Montaña – INAIGEM, del Perú de reciente creación (Dic. 2015), tiene como una de sus funciones: Generar conocimiento mediante la investigación científica y el desarrollo tecnológico en el ámbito de glaciares y ecosistemas de montaña. Entre los ecosistemas priorizados para investigar se tiene a los Bosques Relictos Andinos, donde el género *Polylepis*, por las razones descritas anteriormente, tiene el protagonismo. En este año 2016 se han instalado, en áreas del Parque Nacional Huascarán, dos parcelas de investigación en la quebrada Llaca de la sub-cuenca Quillcay (Figura 4), perteneciente a la cuenca del Santa, una de 3.5 has (18L 230333 UTM 8954447) y otra de 32.5 has (18L 229306 UTM 8952872). Se han cercado con cerco eléctrico (con energía solar). En estas parcelas, se viene investigando la dinámica poblacional, además de la recuperación y conservación de las funciones ecosistémicas de estos importantes relictos.

REFERENCIAS

- Beck, S. G. y Ellenberg, H. (1977). *Entwicklungsmöglichkeiten im Andenhochland in ökologischer Sicht*. Göttingen, Los autores.
- Bitter, G. (1911). Revision der gattung *Polylepis*. *Botanische Jahrbücher für Systematik, Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie*, 45, 564-656.
- Fjeldså, J. 1995. Geographical patterns of neoendemic and relict species of Andean forest birds: The significance of ecological stability areas. *En Churchill, S. P., Balslev, H., Forereo, E. y Luteyn, J. L. (Eds.). Biodiversity and conservation of neotropical montane forests*, 89-102. Bronx, New York Botanical Gardens.
- 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, Dinamarca, NORDECO.
- Geyger, E. (1985). *Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Vegetation im nordwestargentinischen Andenhochland*. Dissertationes Botanicae, 88. Berlín y Stuttgart, J. Cramer.
- Goldstein, G., Meinzer, F. y Rada, F. (1994). Environmental biology of a tropical treeline species, *Polylepis sericea*. *En Rundel, P. W., Smith, A. P. y Meinzer, F. C. (Eds.). Tropical alpine environments: Plant form and function*, 129-149. Cambridge, Cambridge University Press.
- Hoch, G. y Körner, C. (2005). Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline. *Functional Ecology*, 19(6), 941-951.
- Kerr, M. S. (2003). *A phylogenetic and biogeographic analysis of Sanguisorbeae (Rosaceae) with emphasis on the Pleistocene radiation of the high Andean genus Polylepis*. Tesis doctoral, Universidad de Maryland.
- Kessler, M. (1995a). *Polylepis-Wälder Boliviens: Taxa, Ökologie, Verbreitung und Geschichte*. Dissertationes Botanicae, 246. Berlín y Stuttgart, J. Cramer.
- Kessler, M. (1995b). The genus *Polylepis* (Rosaceae) in Bolivia. *Candollea*, 50, 131-171.
- Kessler, M. y Schmidt-Lebuhn, A. N. (2006). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organisms Diversity and Evolution*, 6(1), 67-69.
- Körner, Ch. (1999). *Alpine plant life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Heidelberg, Springer.
- Simpson, B. B. (1979). A revision of the genus *Polylepis* (Rosaceae: Sanguisorbeae). *Smithsonian Contributions to Botany*, 43, 1-62.
- Simpson, B. B. (1986). Speciation and specialization of *Polylepis* in the Andes. *En Vuilleumier, F. y Monasterio, M. (Eds.). High Tropical Biogeography*, 304-315.
- Schmidt-Lebuhn, A. N., Kessler, M. y Kumar, M. (2006). Promiscuity in the Andes: Species relationships in *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) based on AFLP and morphology. *Systematic Botany*, 31(3), 547-559.

El **Foro Internacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña**, realizado en Huaraz del 10 al 13 de agosto de 2016, fue una actividad desarrollada por el INAIGEM con el apoyo de diversas instituciones a través de un comité organizador, así como de entidades auspiciadoras. Uno de los resultados más importantes de este evento fue la **Declaración de Huaraz**, documento que recoge y resume los aspectos relevantes a abordarse a nivel nacional en materia de Glaciares y Ecosistemas de Montaña que fueron tratados en cuatro mesas temáticas:

1. Recursos Hídricos de Glaciares y Ecosistemas de Montaña
2. Mecanismos de financiamiento para la gestión de Ecosistemas de Montaña.
3. Riesgos glaciares y asociados a ecosistemas de montaña.
4. Biodiversidad y uso sostenible de ecosistemas de montaña para la seguridad alimentaria.

Para la obtención de los resultados del Foro, se constituyó una comisión sistematizadora conformada por especialistas del INAIGEM y de la Dirección General de Información e Investigación Ambiental del MINAM. Esta comisión se encargó de recoger, analizar y sintetizar la información presentada durante las conferencias del Foro y los trabajos grupales por cada mesa temática.

La **Declaración de Huaraz** constituye un insumo fundamental en la formulación de la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

DECLARACIÓN DE HUARAZ

Preámbulo

Los efectos del cambio climático afectan a todas las latitudes del planeta, exponiendo a graves problemas a los pueblos y a la biodiversidad mundial.

El documento final de la Cumbre sobre Desarrollo Sostenible (Rio +20) denominado “El Futuro que Queremos”,¹ reconoce el importante rol de los ecosistemas de montaña para el desarrollo sostenible y como fuente de recursos hídricos para gran parte de la población mundial, así como su vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático.

A nivel global se reconoce la importancia de los glaciares y ecosistemas de montaña y los servicios ecosistémicos que ellos brindan. Así, como parte de los acuerdos tomados durante la Vigésima Conferencia Mundial de las Partes reunida en Lima (COP 20), se vio la necesidad de dotar a los países de una institucionalidad que responda al reto de elaborar ciencia en beneficio de la población y los tomadores de decisión.

Como resultado de estos importantes acuerdos globales nace el INAIGEM, entidad adscrita al Ministerio del Ambiente del Perú, la cual tiene como misión generar tecnología e información científica aplicada sobre glaciares y ecosistemas de montaña, tomar medidas de prevención en el marco del cambio climático, con calidad, oportunidad y pertinencia, en beneficio de la población.

En este marco, el INAIGEM desarrolló el Foro Internacional sobre Glaciares y Ecosistemas de Montaña (FIGEM) que tiene por objetivo poner a disposición de instituciones públicas, privadas y sociedad civil, insumos de conocimiento y experiencias sobre glaciares y ecosistemas de montaña que promuevan el desarrollo sostenible de las poblaciones y territorios de montaña.

¹ Documento final de la Cumbre sobre Desarrollo Sostenible (Rio +20) “El Futuro que Queremos” (junio 2014) https://rio20.un.org/sites/rio20.un.org/files/a-conf.216-l-1_spanish.pdf

Nosotros

Académicos, científicos y políticos de diferentes disciplinas nacionales e internacionales como el Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), el Servicio de Áreas Naturales Protegidas (SERNAMP), el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNSAM), la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco (UNSAAC), Universidad Nacional San Agustín (UNSA), Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), Dirección General de Investigación e Información Ambiental (MINAM), la Dirección General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos (MINAM), la Dirección General de Diversidad Biológica (MINAM), la Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural (DGEVFPN), el Center for Research in Water Resources (RWR), The University of Texas at Austin, Charles University in Prague Czech Republic, Global Change Research Institute; Czech Academy of Sciences; Universidad de Zurich; University of Arizona, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Universidad de Massachusetts, Meteodat GmbH (Zurich-Switzerland); Universidad de Cardiff (Reino Unido), University of Waterloo, Water Assessment and Advisory Global Network (WASA-GN) reunidos frente a los desafíos del momento.

Consideramos

Que la adaptación al cambio climático es un desafío mundial que incumbe a todos, con dimensiones locales, subnacionales, nacionales, regionales e internacionales.²

Que tan solo un 2.4% del agua disponible en el mundo es dulce, y de éste, el 68% corresponde a glaciares y nieve permanente. Además, por ejemplo, se estima una pérdida del 42% de la superficie glaciar en los últimos 40 años, por lo que su estudio e investigación, no es solo de interés nacional, sino mundial.

Que el Perú es un país de montañas, su territorio alberga el 71% de los glaciares tropicales del mundo, así como más del 70% de la biodiversidad del planeta; este importante patrimonio natural se encuentra en una situación de vulnerabilidad que necesita ser atendida.

Que resulta necesario desarrollar una agenda específica de investigación sobre glaciares y ecosistemas de montaña que contribuya con la planificación local, las medidas de adaptación al cambio climático, la mitigación del riesgo, y en la formulación de políticas públicas.

Que cada año, se invierten recursos por más de US\$ 10 mil millones en diversas cuencas alrededor del mundo a través de mecanismos financieros innovadores como fondos de agua y mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos.³

Que un factor clave para asegurar el sostenimiento financiero de las medidas orientadas a la gestión de estos sistemas resulta en la identificación, cuantificación y valoración de los servicios ecosistémicos que ellos proporcionan.

Reconocemos

La necesidad de establecer medidas de adaptación y de mitigación en los glaciares y ecosistemas de montaña, se pondría en grave riesgo la agrobiodiversidad mundial, la seguridad alimentaria, la disponibilidad de recursos hídricos para sus diversos usos y se incrementaría significativamente los niveles de vulnerabilidad ante desastres de origen glaciar.

La labor de adaptación debería llevarse a cabo tomando en consideración la diversidad de enfoques, conocimiento y experiencia de los distintos grupos humanos que habitan los ecosistemas de montaña y con la información científica disponible, con miras a integrar la adaptación en las políticas y medidas socioeconómicas y ambientales pertinentes.⁴

La importancia de hacer plenamente efectivo el desarrollo y la transferencia de tecnología para mejorar la capacidad de resiliencia de los ecosistemas de montaña.

La importancia de los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos que sirven para proteger y restaurar los ecosistemas de montaña, complementando estrategias convencionales para la conservación.

² Acuerdo de París Art. 7.

³ (Gena Gammie – Associate Director, Water Initiative, Forest Trends).

⁴ Acuerdo de París Art. 7.

Proponemos

Fortalecer la investigación científica sobre glaciares y ecosistemas de montaña, de modo que aporte información relevante para la toma de decisiones. Ello, potenciando el intercambio de información, las buenas prácticas, experiencias y lecciones aprendidas.

Impulsar proyecto, planes, programas y políticas adaptación al cambio climático y mitigación de riesgos en los glaciares y ecosistemas de montaña, priorizando el bienestar de las poblaciones locales.

Cooperar en la adopción de las medidas que correspondan para mejorar la educación, la formación, la sensibilización y participación del público y el acceso público a la información sobre los glaciares y los ecosistemas de montaña.⁵

Fortalecer e innovar en los mecanismos de financiamiento para el pago por los servicios ecosistémicos de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

En el caso peruano, para lograr la gobernabilidad ambiental, se impulse el rol rector y director del INAIGEM en el ámbito de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña, poniendo énfasis en:

- a. Ser un referente nacional e internacional sobre la información e investigación.
- b. Impulsar las iniciativas y desarrollar la investigación ambiental aplicada desarrollada a partir de los lineamientos de la Agenda de Investigación Ambiental al 2021.
- c. Acoger las investigaciones y a los investigadores nacionales e internacionales, fortaleciendo la cooperación. el intercambio de información y permitiendo superar las barreras burocráticas.
- d. Definir las acciones de adaptación y medidas de mitigación a seguir; y desarrollando estrategias para fortalecer la agrobiodiversidad necesarias para la seguridad alimentaria.
- e. Atender la problemática de los riesgos de origen glaciar.

Hecho y firmado en la ciudad de Huaraz, Capital de la Región Ancash, República del Perú, a los 12 días del mes de agosto de 2016.

⁵ Acuerdo de París Art. 12.

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. Los trabajos recibidos son evaluados por árbitros externos según criterios de calidad.

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 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.
- j) Figuras, tablas y mapas muy legibles, proporcionadas aparte en formato JPG (.jpg).
- k) Pueden enviar cualquier pregunta al correo electrónico swegner@inaigem.gob.pe .

[Nota: Las instrucciones más detalladas y actualizadas se pueden encontrar en la página web del INAIGEM – www.inaigem.gob.pe]



INAIGEM
Instituto Nacional de Investigación en
Glaciares y Ecosistemas de Montaña