



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Año 5, N°8
Agosto 2023

ISSN 2519-7649

REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

EDICIÓN DEL BICENTENARIO

NÚMERO 8



REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Número 8 - Agosto 2023

Presidente Ejecutivo

Dra. Beatriz Fuentealba Durand

Directores y jefes:

Ing. Jesús Gómez López
Director de Investigación en Glaciares (DIG)

M.Sc. Mirtha Camacho Hernández
Directora (e) de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

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

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

Dr. Pedro Tapia Ormeño
Jefe de la Oficina Desconcentrada Macrorregión Centro - Lima

Editado por:

Mg. Steven A. Wegner

Comité consultivo:

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

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

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

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

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

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

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

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

www.inaigem.gob.pe

Agosto 2023

Diagramación y diseño portada: Sabí Torbisco Cervantes y Joan Ramírez Romero

Foto de portada: Renny Daniel Diaz Aguilar

PRESENTACIÓN

Este número de la *Revista* contiene nueve artículos originales que tratan los temas principales de glaciología, cambio climático y la vida e investigación en los Andes. Aunque las cordilleras del Perú, especialmente la Cordillera Blanca, forman el escenario principal de varios artículos, otros se enfocan en las cordilleras de Chile y Colombia y hasta el Himalaya de Nepal. Además, se incluyen temas desde la antropología y botánica hasta la zoología, cambios socio-ambientales, socio-políticos y legales, fotografía comparativa de casi un siglo atrás, saberes ancestrales de generaciones atrás y evidencia “crioclimática” de miles de años atrás.

Los contribuidores provienen de tres continentes --Sudamérica, Europa y Norteamérica-- y una docena de países. Muchos de los investigadores tienen reputaciones profesionales ya establecidas; además, algunos han contribuido artículos para anteriores números de nuestra *Revista*. Durante el tiempo de la pandemia en 2021, cuando el trabajo de oficina había cambiado a trabajo remoto, surgió la idea de editar un número especial de la *Revista* en reconocimiento del Bicentenario de la Independencia del Perú (1821-2021). Aunque ya pasó la fecha inicial del Bicentenario, considerando que el proceso de independencia duró hasta la Batalla de Ayacucho el 9 de diciembre de 1824, todavía estamos a tiempo para celebrar. La mayoría de los autores fueron invitados específicamente para contribuir a esta publicación y cumplieron con creces. Extendemos nuestro agradecimiento por su participación y, a la vez, nuestras disculpas por cualquier incomodidad que la demora en la edición podría haberles causado. Al final, recibimos tantas contribuciones que son suficientes para publicar dos números, el 8 y el 9, de la *Revista* este año.

En todo caso, esperamos que fuera una experiencia positiva para todos, ahora finalmente culminada con la publicación de sus aportes.

El Editor

CONTENIDO

MÁS ALLÁ DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS MONTAÑAS: CAMBIOS SOCIO-AMBIENTALES EN LA SIERRA PERUANA Julio C. Postigo	7
LOS GLACIARES DE ROCAS EN LA CORDILLERA DEL CENTRO DE CHILE Cedomir Marangunic D.	17
THE CHALLENGES, SUCCESSES, AND PRELIMINARY STATUS REPORT ON THE 2019 RECOVERY OF ICE CORES FROM NEVADO HUASCARÁN, EARTH'S HIGHEST TROPICAL MOUNTAIN Lonnie G. Thompson, Ellen Mosley-Thompson, Forrest Schoessow, Mary E. Davis, M. Roxana Sierra-Hernández, Emilie Beaudon and the Huascarán team	31
LA EVOLUCIÓN DE HUMEDALES TRAS EL RETROCESO GLACIAR EN LOS ANDES COLOMBIANOS Juan Carlos Benavides y Anamaría Roza	43
ADAPTIVE CAPACITY OF FARMING COMMUNITIES TO CLIMATE CHANGE IN THE PERUVIAN ANDES: PAST, PRESENT AND FUTURE (PRELIMINARY FINDINGS OF THE ACCESS PROJECT) Nicholas Branch, Francisco Ferreira, Kevin Lane, Andrew Wade, Douglas Walsh, Josie Handley, Alex Herrera, Harvey Rodda, Mike Simmonds, Frank Meddens, Stuart Black	51
REPEAT PHOTOGRAPHY OF ERWIN SCHNEIDER'S 1932-1960 CARTOGRAPHIC EXPEDITIONS TO THE PERUVIAN ANDES AND NEPAL HIMALAYA: NEW OPPORTUNITIES FOR FUTURE HIGH MOUNTAIN RESEARCH Alton C. Byers	69
GEOMORPHOLOGICAL IMPRINTS OF MAJOR GLACIAL LAKE OUTBURST FLOODS (GLOFS): FIRST INSIGHTS FROM PERU-WIDE GLOF INVENTORY Adam Emmer	77
ENTRE EL ESTADO, LA COMUNIDAD Y EL ABUELO: AGUA Y JUSTICIA CLIMÁTICA EN EL SUR DEL CALLEJÓN DE HUAYLAS Mattias Borg Rasmussen	89
PERCEPCIONES TRADICIONALES DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS Y PRÁCTICAS RITUALES EN LA CORDILLERA BLANCA, ANCASH (PERÚ) Doris Walter	95

Más Allá del Cambio Climático y las Montañas: Cambios Socio-ambientales en la Sierra Peruana*

Beyond Climate Change and Mountains: Socio-environmental Changes in the Peruvian Highlands

Julio C. Postigo¹

¹ Departamento de Geografía, Indiana University

Resumen

El presente ensayo está organizado en cuatro secciones. La primera plantea el marco analítico que uso para aproximarme y comprender la sierra. La segunda presenta algunos de los efectos del cambio climático en los Andes peruanos. La tercera plantea algunos procesos no climáticos y las formas en las que estos procesos sociales inciden en la vulnerabilidad de la sierra frente a la creciente variabilidad climática antropogénica. Finalmente, planteo algunas conclusiones.

Palabras clave: *Vulnerabilidad, doble exposición, Andes, Perú*

Abstract

This essay is organized into four sections. The first presents the analytical framework that I use to approach and understand the sierra. The second presents some of the effects of climate change in the Peruvian Andes. The third raises some non-climatic processes and the ways in which these social processes affect the vulnerability of the mountains in the face of increasing anthropogenic climate variability. Finally, I draw some conclusions.

Keywords: *Vulnerability, double exposure, Andes, Peru*

El Marco Analítico

Mi análisis tiene dos consideraciones. La primera es que los Andes no son, simplemente, montañas, sino son sistemas socio-ecológicos (Liu et al., 2007; Ostrom, 2009). Es más, considerarlas solo como montañas enfatiza el aspecto biofísico y desestima los procesos sociales que sobre ellas han realizado los habitantes andinos por miles de años. La segunda consideración, directamente relacionada con la anterior, es que los sistemas socio-ecológicos andinos peruanos (SSEAP) se han forjado mediante la interacción transformadora, fundamentalmente con fines productivos, entre los grupos humanos y las características biofísicas y climáticas de los Andes (Brush, 1976; Earls,

2009; Postigo, 2013; Young, 2009). Esta interacción se ha llevado a cabo a lo largo de miles de años y continúa ocurriendo (Earls, 2006; Erickson, 1992; Moseley, 2001; Sandor & Homburg, 2017).

El marco analítico, esquematizado en la Figura 1, plantea que los SSEAP están expuestos a un conjunto de perturbaciones que se resumen como socio-ambientales. Estas perturbaciones pueden operar como procesos sostenidos de baja intensidad (i.e., presiones) o ser abruptos con inicio y conclusión claramente delineadas (i.e., pulsos). Las relaciones entre estas perturbaciones y los Andes son complejas y cambiantes a lo largo del tiempo. Esta complejidad se deriva de la propia dinámica de los componentes biofísicos de los Andes, del hecho que la intensidad de las perturbaciones se modifica por sus interacciones con procesos más allá de los SSEAP —e.g., precio internacional de mercancías como los minerales, deforestación en la Amazonía— y en periodos temporales que superan nuestra capacidad de detección o predicción. En otras palabras: Las perturbaciones pueden operar a través de múltiples niveles (e.g., global, regional) u originarse fuera de los SSEAP pero tener impactos sobre estos. Para muestra, un botón: los impactos del calentamiento global sobre los glaciares tropicales andinos. Como si la cosa no fuera lo suficientemente compleja y complicada, es posible que al pasar de un nivel a otro la intensidad de las perturbaciones se modifique agudizándose o atenuándose. Más aún, las perturbaciones no sólo operan independientemente, si no que interactúan entre ellas produciendo sinergias (Leichenko & O'Brien, 2008) que impactan combinada y novedosamente en los Andes peruanos. En otras palabras, la sierra se encuentra doblemente expuesta a estos interactuantes procesos.

La vulnerabilidad de los productores agropecuarios a esta doble exposición se relaciona también con su contexto biofísico, institucional y tecnológico (Leichenko & Silva, 2014; O'Brien & Leichenko, 2000; O'Brien et al., 2004). Es sobre este contexto que el cambio climático opera y el que define las respuestas que la sociedad puede implementar

*Este artículo es una versión ligeramente "corregida y aumentada" de la conferencia magistral *Más allá del cambio climático y las montañas: Cambios socio-ambientales en la sierra peruana*, presentada en el Simposio "Las Montañas: Nuestro Futuro" que fue organizado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña en la ciudad del Cusco el 10 de diciembre de 2019.

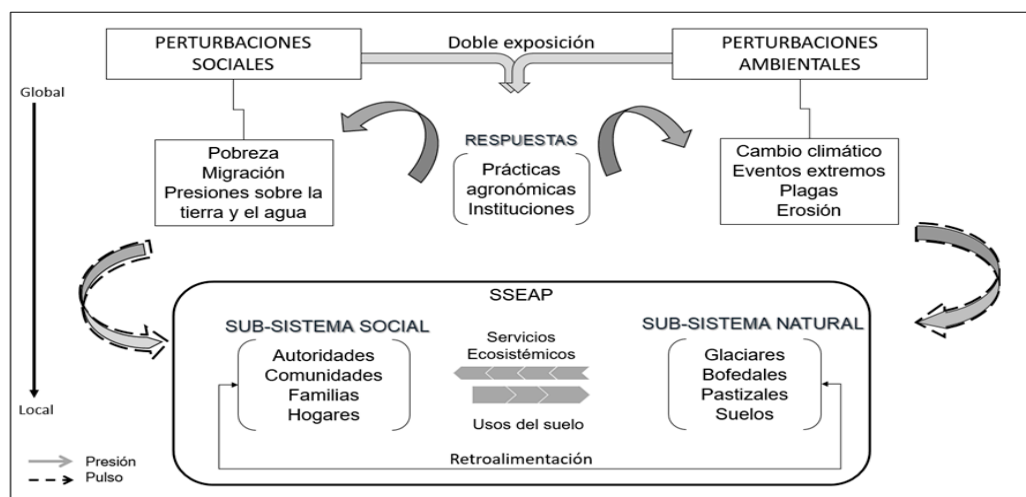


Figura 1. Los efectos del cambio climático en los sistemas socio-ecológicos andinos peruanos.

frente a los cambios ambientales globales (Leichenko & O'Brien, 2019; O'Brien et al., 2007). En otras palabras, los productores agropecuarios están expuestos, además del cambio climático, a procesos socio-económicos (sobre esta doble exposición ver: Leichenko & O'Brien, 2008; O'Brien & Leichenko, 2003; Thomas et al., 2019; Wilbanks & Kates, 2010) que influyen en sus decisiones productivas.

Es también característico de los sistemas socio-ecológicos que existan retroalimentaciones entre los sub-sistemas que los componen. Estas retroalimentaciones pueden reducir o incrementar la inestabilidad de los sistemas (Chapin III et al., 2009). Por ejemplo, para responder a la creciente pérdida de biodiversidad se viene promoviendo los pagos por servicios ecosistémicos como parte de las estrategias de conservación. Sin embargo, esta respuesta podría llevar a una mayor inestabilidad de los sistemas naturales al hacer solo relevantes (i.e., valorizados) aquellos ecosistemas que generen servicios útiles para los humanos o haciendo solo transables aquellos servicios para los que haya mercados o simplemente porque hay funciones ecosistémicas no conocidas (no valorizables) (Redford & Adams, 2009).

La sierra peruana —como casi todas las cadenas de montañas del planeta— es el producto de la continua y milenaria co-evolución entre sus elementos biofísicos, sus características ambientales, y las actividades productivas llevadas a cabo por grupos humanos socialmente organizados. En este sentido, una rápida mirada a nuestro pasado muestra que en esta milenaria co-evolución, las distintas sociedades humanas asentadas en los Andes peruanos han tratado de mediatizar o manejar, con distintos niveles de éxito, las perturbaciones ambientales y climáticas. Por ejemplo, durante el Holoceno medio (8.6 - 5.6 ka) alternaron periodos secos con periodos húmedos, mil años después (4.6 - 4.2 ka) hubo una pronunciada sequía a la que siguió un prolongado periodo de clima húmedo, el mismo que tres mil años después (entre 1.8 - 1.2 ka) coincidió con el florecimiento de la cultura Nasca en las estribaciones de los Andes centrales del Perú.

Sin embargo, una abrupta y continuada sequía marca el final de este periodo así como el ocaso de Nasca y Wari (Schitteck et al., 2015).

Así las cosas, el clima ha sido un factor determinante en las dinámicas socio-económicas y demográficas de los Andes. Hacia el final de la cultura Nasca (~640 AD), se tiene evidencia de migraciones de los valles costeros sur peruanos hacia las zonas altoandinas que coinciden con un marcado incremento de la variabilidad climática. Posteriormente, se da un flujo migratorio en sentido inverso hacia la costa que coincide tanto con una sequía en el sureste andino como con la mejora del clima en la costa, justamente luego de la desaparición de Wari y Tiahuanaco (~1200 AD) (Fehren-Schmitz et al., 2014).

En la actualidad, de acuerdo a Ponce y colegas (2015) las tendencias del clima en los Andes peruanos son el incremento de la temperatura máxima promedio, de manera más aguda en el período de agosto a octubre —que es el del inicio de la “campana grande” de los principales cultivos de la sierra peruana— y un incremento menos pronunciado de la temperatura máxima entre noviembre y enero. Asimismo, se identifica, a pesar de una gran variabilidad, las tendencias tanto de incremento de la precipitación en los trimestres de la época de lluvias como la disminución de la misma en los meses de inicio de la campaña agrícola (Ponce et al., 2015).

Una peculiaridad del calentamiento global es que este es más pronunciado con el aumento de la altitud. Un análisis del 2000-2017 muestra que mientras la tasa promedio de incremento de la temperatura invernal diurna de la superficie es de 1.0 °C/ década, esta tasa decrece a 0.5 °C/ década en el rango altitudinal de 1000-1500 m s.n.m. Sin embargo, la tasa se incrementa 70% por encima de los 5000 m s.n.m. Siguiendo esta tendencia, la temperatura de la superficie en las noches de invierno aumenta consistentemente con la altitud (Aguilar-Lome et al., 2019). Asimismo, en estos momentos ya estamos en condiciones de asegurar que el mayor calentamiento ocurrirá en invierno (Thompson et al., 2017).

El incremento de la temperatura es una de las principales causas del retroceso de los glaciares, el mismo que es, con justificada razón, una de las expresiones más perceptibles del cambio climático en los Andes peruanos, tal como lo corroboran los grandes cambios observados, detectados y medidos en la última media centuria (e.g., Rabatel et al., 2013; Thompson et al., 2021; Vuille et al., 2018).

Los patrones más saltantes en los glaciares peruanos son su disminución en área glacial y su fragmentación. En la década de los 70, el área glacial de la Cordillera Blanca era 723 km², lo que equivalía al 40% del volumen glacial del Perú. Sin embargo, en el 2010 el área disminuyó a 482 km² (Mark et al., 2017). Un patrón semejante se observa en el área glacial del Huaytapallana que en 1976 era de 53.6 km² y treinta años después, en 2006, se contrajo a 14.5 km² (Mark et al., 2017). En forma similar, la Cordillera Vilcanota ha perdido 48% de su área glacial desde los 1960s (Drenkhan et al., 2018). Adicionalmente a una reducción general del área total glacial, las masas de hielo de cada uno de los glaciares han sufrido una fragmentación con el consiguiente aumento del número de glaciares, pero, como hemos visto antes, no del área cubierta por hielo. En 1970, la Cordillera Blanca tenía 722 glaciares mientras que en el 2003 la cifra aumentó a 755 (Young et al., 2017).

La disminución de la masa glacial y de nieve en los Andes peruanos afectará, en el mediano y largo plazo, la provisión de agua en la época de estiaje, con efectos en la cantidad y temporalidad de su disponibilidad para el consumo humano, la irrigación de la agricultura de exportación, actividades productivas como la minería y la generación de energía hidroeléctrica (Bradley et al., 2006; Mark et al., 2010; Vergara et al., 2007). Según las estimaciones de Drenkhan y colegas para la Cordillera Vilcanota-Urubamba, la contribución de agua glacial al caudal es de ~25%, la misma que se estima se reducirá dramáticamente en el mediano plazo (i.e., próximas décadas) hasta volverse prácticamente irrelevante (~0-3%) al final del siglo XXI (Drenkhan et al., 2019).

La conexión glaciares-agua es muy conspicua y relevante en los Andes. Sin embargo, el cambio climático impacta otros aspectos de estos sistemas socio-ecológicos (Rojas et al., 2021). En este sentido, los modelos climáticos proyectan un desplazamiento de ecosistemas y especies a mayores altitudes (Ramirez-Villegas et al., 2014; Tovar et al., 2013). Se ha detectado el desplazamiento a mayores altitudes del límite superior del rango altitudinal de animales (Seimon et al., 2007). Las especies vegetales también se están desplazando a altitudes mayores, pero con cambios en la composición de las comunidades arbóreas tropicales y subtropicales mediante el incremento de abundancia relativa de especies de altitudes menores y temperaturas mayores (Duque et al., 2015; Fadrique et al., 2018).

Pero no se trata de procesos simples. Las condiciones topográficas, la heterogeneidad de hábitats en la diversa gradiente ambiental andina, el incremento de la

temperatura, y un rango de temperatura diario mayor que el inter-estacional a lo largo del año plantean severos retos para las especies y la formación de suelos luego del retiro glacial (Cuesta et al., 2019).

En el glaciar Yanamarey (Cordillera Blanca), Zimmer y colegas (2018) identificaron un consistente incremento de la abundancia y riqueza de especies, así como mayor cobertura de plantas, con un claro patrón de mayor abundancia de especies tolerantes al estrés, y siendo el viento el mecanismo prevalente de dispersión de semillas. La consecuencia de este patrón es el desbalance en la composición vegetal por la escasez de especies con mecanismos de dispersión por animales y agua.

Otro cambio será el de los humedales que probablemente pasen de ser permanentes a estacionales o dependientes de la lluvia por la disminución del suministro de agua tanto por el derretimiento glacial como por las alteraciones del régimen de las precipitaciones (Dangles et al., 2017; Polk et al., 2017).

Las modificaciones de las características climáticas no solo limitarán o habilitarán que cultivos e insectos se desplacen a zonas que antes les eran adversas, si no que impactará en la distribución de la biodiversidad. Sin embargo, aquellas especies incapaces de desplazarse en concordancia con las cambiantes condiciones o que no encuentren un hábitat para su existencia en las montañas serán diezmadas o extintas (Freeman et al., 2018; Larsen et al., 2011).

Otro elemento cuya presencia se incrementará son los cuerpos de agua. Aquí, en la cuenca Vilcanota-Urubamba, Drenkhan y colegas (2018) proyectan que en el 2050 podría haber 14 lagos (RCP 2.6) y 16 (RCP 8.5). El número de lagos en el escenario más pesimista (8.5) se duplicaría para el 2100. Consecuentemente, al final de este siglo, el área de los cuerpos de agua aumentaría en 0.9 km² y 1.6 km² respectivamente para el RCP 2.6 y el RCP 8.5, y el volumen en 32.4 Mm³ y 41.4 Mm³ (Cuesta et al., 2019). Las amenazas derivadas de lagos glaciares son antiguas y de trágicas consecuencias en el Perú (Carey, 2010). Creciente evidencia muestra el aumento y expansión de las amenazas y los impactos relacionadas con lagos glaciares (Drenkhan et al., 2019; Thompson et al., 2021). Adicionalmente, el proyectado aumento de eventos extremos como fuertes o prolongadas lluvias podría afectar la estabilidad del suelo y comprometer la seguridad de las poblaciones ubicadas en las zonas bajas (Anderson et al., 2011).

Los bosques andinos también se están modificando por el cambio climático, con las siguientes resaltantes características: 1) el aumento neto de la vegetación leñosa ocurre en las zonas por encima de los 1000 m s.n.m.; 2) la mayoría de la pérdida de la cobertura boscosa se da en las zonas ubicadas entre los 1000 y 1500 m s.n.m. por la conversión de bosque en pasturas, y se le atribuye a las nuevas vías de acceso a las zonas bajas de la Amazonía en

Amazonas, Cusco, Madre de Dios y Puno; 3) el aumento de la vegetación leñosa en las zonas altas podría deberse al incremento de la temperatura y la sequedad, lo que facilitaría la expansión de los arbustos y la invasión de los árboles en las pasturas altoandinas; y 4) el aumento y disminución de la cobertura boscosa en las zonas altas y bajas, respectivamente, podría estar relacionado con emigración de las zonas altas, y la expansión de la frontera agrícola por los migrantes en la Amazonía (Aide et al., 2019).

La producción agropecuaria es afectada con las alteraciones climáticas en los Andes peruanos, aunque, al mismo tiempo, esta misma producción altera en gran medida los Andes. Los cambios en la precipitación y la temperatura podrán llevar a que la agricultura y ganadería se intensifiquen, e incluso que las fronteras agrícolas y ganaderas se expandan tanto hacia las zonas altoandinas como hacia las tierras bajas en los flancos orientales que antes tenían condiciones climáticas inadecuadas para estas actividades (Anderson et al., 2011).

Las alteraciones climáticas podrían tener otros impactos en los sistemas agropecuarios. El incremento de la precipitación en algunas zonas podría disminuir la dependencia del riego, con la implicancia concomitante que el excedente de agua se redireccione para expandir extensiones bajo riego. El aumento de la temperatura, más allá de lo esperado —incrementando la evapotranspiración y, por ende, la demanda de agua de las plantas— llevaría a un efecto contrario: el mayor uso de riego (Ponce et al., 2015). La diversidad de cultivos podría también tener efectos contrarios según se incremente la precipitación o la temperatura. En el primer caso (más precipitación en la época de lluvias) aumenta la diversidad de cultivos, con nuevas especies para estas condiciones climáticas más favorables; por el contrario, el incremento de la temperatura disminuiría la diversidad al habilitar cultivos rentables que se volverían dominantes en la cartera de los pequeños agricultores, sobre todo en la de aquellos que estaban poco involucrados en una dinámica mercantil (Ponce et al., 2015).

La creciente variabilidad climática afecta los cultivos y las decisiones productivas de los agricultores (Postigo, 2014). Las modificaciones en los patrones de precipitación, particularmente el inicio tardío de la estación de lluvias hace que los agricultores retrasen la siembra, mientras que la creciente intensidad y frecuencia de eventos extremos como heladas y granizadas impactan en la producción, e incluso los estaría llevando a cambiar sus medios de vida por aquellos basados en la ganadería (Lennox, 2015). Sin embargo, son los factores socio-económicos, específicamente los bajos precios de los cultivos, los que motivan la transición hacia la ganadería ya que esta tiene precios mejores y más estables (Lennox, 2015).

Si los actuales sistemas de cultivos se mantuviesen en su actual ubicación, con un clima más caliente tendrían que enfrentarse, muy probablemente, a nuevas plagas y

enfermedades lo que afectará su productividad. Se estima que la producción de maíz y papas caería por encima del 87% en condiciones de mayor temperatura (escenarios de 1.3 °C y 2.6 °C de incremento) mayormente debido a las plagas (Tito et al., 2018). Asimismo, si los cultivos migrasen a mayores elevaciones donde, potencialmente, encontrarían temperaturas más adecuadas a sus requerimientos, los rendimientos se afectarían por tener suelos con pocos nutrientes y fertilizantes; lo que podría derivar en una posible respuesta de aumento del uso de fertilizantes químicos, así como menor área apta para cultivar, en tanto el área en general disminuye a mayor altitud en las montañas. Se estima que la producción de maíz disminuiría de 21 a 29% en los suelos diferentes. Las pérdidas económicas podrían llegar hasta US \$2300 anuales por hectárea (Tito et al., 2018).

Así se puede simplificar la dinámica de los Andes peruanos, fundamentalmente, a sus relaciones con el clima. En la siguiente sección se refiere, sumariamente, a procesos no climáticos que influyen substancialmente en las dinámicas de la sierra peruana.

Doble Exposición (Procesos Climáticos y No Climáticos) y Vulnerabilidad en la Sierra del Perú

No cabe duda de que los efectos del cambio climático impactarán, directa e indirectamente, en la productividad de los hogares andinos, y que las actividades de estos afectan las condiciones materiales de su propio sustento como son los suelos. Sin embargo, la vulnerabilidad de los SSEAP precede al actual cambio climático y se relaciona con la situación socio-económica de los hogares. Una mirada a la co-evolución de los ecosistemas y las sociedades andino peruanas, desde el siglo XVI, muestra su contribución a los fundamentos del actual Capitaloceno al haber provisto baratos oro y plata, fuerza de trabajo y naturaleza que se convirtieron en mercancías para España y el resto de las monarquías europeas (Patel & Moore, 2017). Más recientemente, los SSEAP se han visto doblemente expuestos a los efectos tanto de la globalización como del cambio ambiental global (Earls, 2006; Postigo, 2021).

Uno de estos procesos es la minería, cuyas operaciones durante varios siglos han alterado los medios de vida y los paisajes andinos (Bebbington & Bury, 2009; Fisher, 1977), aunque quizá su expresión más visible sean los conflictos sociales (e.g., Bebbington, 2007; De Echave et al., 2009). Hay al menos tres aspectos en los que la minería afecta los medios de vida: 1) la cantidad y calidad del agua, 2) los sistemas de tenencia de la tierra, y 3) las oportunidades laborales. Así, la minería contamina el agua y disminuye su disponibilidad, debilita los sistemas comunales de manejo de recursos, e incrementa la inequidad en el acceso y la distribución a estos (Bebbington & Williams, 2008; Bebbington et al., 2018; Brain, 2017; Castro Salvador, 2013)

La minería requiere un conjunto de servicios más allá de los confines de la operación propiamente dicha, desde carreteras y vivienda hasta restaurantes y entretenimiento, lo que usualmente intensifica la mercantilización de la economía local e incrementa los flujos de personas y de dinero, así como la delincuencia (Brain, 2017). Mientras la dinamización de la economía local tiene una de sus expresiones más conspicuas en el aumento de la actividad comercial, la mayor movilidad de personas (de foráneos que llegan y de locales que retornan) se expresa con nuevas ideas, demandas, aspiraciones y estilos de vida que no siempre coinciden con el imperante estilo en las comunidades y pueblos, lo que genera tensiones, las mismas que se agravan por la incertidumbre de la continuidad de la operación minera (Castillo & Brereton, 2018).

Otros procesos como la urbanización y el turismo, por un lado, cambian e incrementan la presión sobre los recursos de los Andes peruanos y, por el otro, resignifican los paisajes andinos confiriéndoles la condición de objetos de admiración y contemplación por los turistas, lo que disminuye su tradicional condición de hábitat agropecuario como se aprecia en el Valle Sagrado con su transformación en zona de esparcimiento y terreno para casas de campo para la clase alta.

En esta doble exposición (Leichenko & O'Brien, 2008), los sistemas agropastoriles han incrementado su vinculación con el mercado, lo que ha promovido el cambio de cobertura y uso del suelo. Por ejemplo, en Langui (Cusco) se ha identificado una transición de la agricultura a la ganadería mediante el reemplazo de papas nativas, quinua y kañiwa por pastos mejorados (e.g., avena forrajera) para el ganado vacuno (Lennox, 2015). Este cambio de uso ha ido acompañado por cambios en las prácticas agrícolas y la tecnología usada, donde se ha incrementado la renta del tractor para reemplazar la mano de obra en el arado, incrementando la productividad y ha disminuido tanto la rotación de cultivos como el barbecho sectorial (Lennox, 2015). Aunque se observan patrones similares en la sierra central, esta transición a la ganadería lechera no es unívoca ni exclusiva en la cadena de producción de lácteos, porque existen comunidades experimentando, por ejemplo, en la crianza de camélidos sudamericanos.

Además de los procesos hasta aquí reseñados, las sociedades y hogares rurales andinas también se están modificando. En términos demográficos, hay que resaltar que en el último censo por primera vez los territorios andinos pierden población en términos absolutos. Además se observan los siguientes procesos: 1) feminización de la jefatura del hogar, pasando de 23 a 35% los hogares con jefas de hogar que son, además, en promedio más jóvenes que los varones; 2) envejecimiento de los productores agropecuarios en el que la edad promedio pasó de 47 a 50 años; 3) reducción del tamaño del hogar (de 4.8 a 3.3 miembros); 4) incremento del uso de alguna tecnología de riego (gravedad, aspersión, goteo o exudación) especialmente en las fincas de mayor tamaño; 5) contracción de la diversidad de cultivos manejada por los productores

agrarios, con mayor agudeza en la sierra sur (Caylloma, San Román, Lampa, Azángaro y Huancané) que en la sierra norte, pero es un patrón heterogéneo en la sierra central; y 6) la tenencia de la tierra ha visto un incremento de uso de pequeñas parcelas (minifundio). En el distrito de Langui, entre 1994 y 2012 se incrementó de 24 a 29% el porcentaje de agricultores cultivando parcelas menores de media hectárea y de 42 a 50% la proporción de hogares cultivando una sola parcela, en lugar del antiguo sistema con múltiples parcelas en distintos pisos altitudinales (Lennox, 2015).

Aunque en otras zonas, se identifican dinámicas demográficas diversas tales como comunidades que ven retornar a los jóvenes, o la multiresidencia con comuneros que viven en las ciudades lo que se ha hecho posible, en muchos casos, por la expansión de la red vial que ha acortado los tiempos de desplazamiento entre la comunidad y la ciudad.

En párrafos anteriores se ha mostrado la conexión cambio climático-retroceso de glaciares-provisión de agua. Sin embargo, la doble exposición de los Andes peruanos conlleva a también analizar algunos procesos no climáticos y sus interacciones con los impactos del cambio climático. En este sentido, es crucial considerar la creciente demanda por agua para consumo humano, actividades productivas (e.g., minería y agricultura), y provisión de servicios como energía. Esta creciente demanda hace que la oferta sea insuficiente, más allá del detrimento de la provisión causado por el cambio climático. La perspectiva es que esta demanda crecerá con la expansión de la infraestructura tanto de agua potable en las zonas urbanas y peri-urbanas, como de las grandes irrigaciones en el desierto costero peruano, e incluso con desarrollos agrícolas andinos habilitados por el incremento de la temperatura. Por ejemplo, todo el caudal del río Shullcas, en la época seca, se desvía para el consumo humano y la agricultura, mientras que 105 m³/segundo de las aguas del río Santa se desvían para Chavimochic que irriga la agricultura en la árida costa. Además, se extrae agua para producir 263 MW de electricidad en la central del Cañón del Pato (aunque vuelve al río después de pasar por las turbinas – el editor). Estos usos modifican la distribución y acceso al agua tanto en las cuencas dependientes de glaciares como fuera de ellas (Mark et al., 2017). Es decir, las alteraciones del ciclo hidrológico debidas al cambio climático operarán sinérgicamente con los impactos de creciente demanda de agua e inequidades en la distribución del recurso.

Las modificaciones en la disponibilidad de agua impactarán en la productividad en la cuenca del río Quillcay (Ancash) con la consecuente caída en los ingresos de los hogares (Heikkinen, 2017). Asimismo, se detectó una correlación relativamente fuerte entre el retiro glaciar y las áreas cosechadas de maíz (0.495), papa (0.466) y trigo (0.524), mientras que las correlaciones de estas áreas con la precipitación fueron bajas: maíz (0.077), papa (0.042) y trigo (0.205) (Heikkinen, 2017). La mayor relevancia del retiro glaciar para explicar el área cosechada podría

deberse a que el retiro afecta el agua disponible para regar los cultivos en la época seca. El estudio de Heikkinen (2017) también revela la importancia que los procesos socio-económicos tienen en variables como el tamaño de la superficie cosechada y los precios en la chacra, e indica que el cambio climático solamente contribuye a los efectos que estos procesos tienen sobre los medios de vida de los pobladores andinos.

Si bien la provisión y el uso tienen gran relevancia, la calidad del recurso hídrico es fundamental para aquellos. La calidad del agua tiene también un aspecto espacial que se refiere a la ubicación de las fuentes de contaminación. En la cuenca del río Santa, el agua tiene concentraciones de manganeso superiores a las establecidas en los lineamientos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) en 50% de los puntos de muestreo a lo largo del río, mientras que en los tributarios todos los elementos (aluminio, arsénico, cadmio, hierro, manganeso, plomo y zinc) presentaron, al menos una vez, niveles superiores a los de los lineamientos (Guittard et al., 2017).

Los sedimentos del fondo del río Santa están altamente contaminados, por alguno de los siete elementos evaluados, en cerca del 85% de los puntos de muestra, con arsénico presentando concentraciones 10 veces mayores que las de los lineamientos de la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (Guittard et al., 2017). Asimismo, se establece que los tributarios son la principal fuente de contaminación, la misma que llega a extenderse decenas de kilómetros cuenca debajo de su punto de origen (Guittard et al., 2017).

En los tributarios de las zonas altas de la cuenca del río Santa se combinan la contaminación de antiguas actividades extractivas con la de la reciente expansión minera, lo que compromete la calidad y el acceso al recurso tanto de los pobladores de las zonas altas como de los usuarios ubicados cuenca abajo (Mark et al., 2017). Esta contaminación antropogénica se combina con la que, posiblemente, resulta de la exposición de superficies rocosas rica en sulfatos producto del retroceso glaciar (Fortner et al., 2011).

Una importante fuente de agua está en el subsuelo, y se le considera usualmente para el riego. Sin embargo, es también importante considerar que la humedad del suelo está muy relacionada al nivel de la napa freática. Así, ante la falta de manantes subterráneos, el contenido de humedad en el suelo tiene una clara estacionalidad que muestra una gran dependencia del régimen hídrico (Mark et al., 2017). Asimismo, una vinculación importante a considerar es la que existe entre la evapotranspiración, la humedad del suelo, y el agua subterránea. Al parecer, la principal forma por la que se elimina la humedad del suelo es la evapotranspiración, la que presenta unos niveles bastante altos en la Cordillera Blanca y la cuenca del Shullcas, dejando poca agua para filtrar al subsuelo, limitando la capacidad de retroalimentar los acuíferos y, finalmente, de proveer agua en la cuenca baja (Mark et al., 2017).

Adicionalmente, la situación del agua subterránea en los Andes peruanos está muy poco estudiada, aunque esta contribuye significativamente al caudal de las cuencas glaciares (Somers et al., 2019). Es escaso el conocimiento de los mecanismos de recarga de los acuíferos y cuánto contribuyen estos a los caudales en la época seca (Vuille et al., 2018). En la Cordillera Blanca se estima que, en la época seca, el agua subterránea contribuye entre 24% (Baraer et al., 2015) y 30% (Somers et al., 2016) aunque es pertinente indicar que parte de la recarga de los acuíferos se dan con agua del derretimiento de los glaciares y aún se ignora como la contracción de estos afectará la recarga de aquellos (Gordon et al., 2015).

El cambio de uso del suelo en los Andes impacta en el funcionamiento y la biodiversidad de los suelos andinos llevando, por un lado, a la pérdida de fertilidad. Por otro lado, el cambio de uso influye en el incremento de fósforo, nitrógeno y potasio debido, probablemente, a la mineralización por nutrientes inducida por arar y preparar los suelos para la siembra, mediante abonamiento y agregando residuos de pasturas (de Valenca et al., 2017; Rolando et al., 2018).

Las cuencas que tienen un cambio de uso a la agricultura pierden parte de su capacidad de regular los caudales, lo que se expresa en respuestas a eventos pluviométricos con un mayor, abrupto y más rápido incremento del caudal, mientras que la reducción de los caudales es también acelerada aunque mantiene reducidos flujos base (Ochoa-Tocachi et al., 2016). En estas cuencas el caudal diario promedio es la mitad de las cuencas naturales (i.e., sin agricultura), mientras que la variación en el caudal diario (i.e., desviación estándar/promedio) es alta en la puna cultivada y la natural. Esta se amplía cuando el páramo ha sido modificado por la presencia humana (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Este cambio del uso afectará de forma diferenciada las escorrentías superficiales en las estribaciones de las cuencas andinas según se trate de agricultura, forestación, y ganadería en cuencas del páramo, la jalca y la puna. Las cuencas no intervenidas por actividades humanas, por su parte, tienen una gran capacidad regulatoria que se manifiesta tanto en un retraso como una modulación de los picos de flujo en época de lluvia, y el mantenimiento de flujos básicos en la época de estiaje. Por el contrario, las cuencas sobrepastoreadas responden a las precipitaciones con flujos que rápidamente alcanzan picos para luego caer a sus flujos base (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Los suelos con cultivos y pasturas presentan, debido posiblemente a la mayor cantidad de materia orgánica, abundancia de macrofauna, de la que son particularmente relevante los gusanos de tierra por su impacto en el crecimiento de las plantas, la dinámica de la materia orgánica y la configuración del suelo (de Valenca et al., 2017).

El cambio de cobertura también afecta e influye las dinámicas biofísicas y sociales en los Andes peruanos. La cobertura vegetal (e.g., bosques y pastos) es importante para la conservación y estabilidad de los suelos en zonas montañosas o de pendientes pronunciadas. Sin embargo, en el lustro 2005-2010 se estima que la deforestación de bosques húmedos montanos en el Perú, debido a la expansión de la frontera agraria, tuvo una extensión de un millón y medio de ha (1'452,955 ha). Podemos concluir indicando que las principales amenazas para los bosques húmedos son: 1) la deforestación y la conversión a la agricultura; 2) la fragmentación; 3) la extracción de madera, minerales e hidrocarburos; 4) la recolección de leña y carbón; 5) los cultivos ilícitos; y 6) la expansión urbana y la construcción de infraestructura, incluyendo centrales hidroeléctricas (Tejedor Garavito et al., 2012).

La tendencia general es que los bosques y pastizales menos intervenidos presentan una mayor diversidad de suelos que las zonas con sistemas agrícolas; que los suelos degradados tienen los suelos menos fértiles y más escasa macrofauna; y que hay una significativa correlación entre los parámetros físico-químicos del suelo, la macrofauna de este, y su cobertura vegetal por lo que intervenciones en cualquiera de estos parámetros pueden llevar a efectos concatenados mediante las conexiones del sistema edáfico (de Valenca et al., 2017).

Si bien estas pueden considerarse tendencias generales, aún se está investigando la dinámica de cambios y el conjunto de procesos que se derivan del retiro glaciar y del cambio de cobertura del suelo, más aún porque factores biofísicos (e.g., orientación y topografía), sociales (e.g., uso del suelo y sistemas de tenencia), climáticos, y las mismas perturbaciones son determinantes en los niveles locales (Young et al., 2017).

Conclusiones

El cambio climático se ha posicionado como la amenaza actual más importante a los SSEAP debido a que su creciente magnitud, intensidad y cantidad de eventos abruptos proyectan efectos devastadores sobre poblaciones, sus medios de vida e infraestructura. El posicionamiento protagónico del cambio climático en las agendas políticas y de desarrollo también se debe a la proliferación de actores (e.g., gubernamentales y no-gubernamentales, dedicados a la investigación y la acción) realizando actividades (e.g., mitigación, adaptación, gestión de riesgos), y por supuesto a los recursos financieros que el cambio climático moviliza y ofrece.

El derretimiento y la concomitante reducción del área glacial es uno de los efectos más notorios del cambio climático. Sin embargo, la reducción de la disponibilidad del agua, especialmente en la estación seca, parece ser la presión con consecuencias de mayor alcance de este proceso. Es pertinente tener presente, sin embargo, que también se ha incrementado la amenaza de eventos o

pulsos como avalanchas, que se relacionan tanto con el cambio climático como con la preexistente vulnerabilidad social de las poblaciones expuestas, así como la limitada capacidad política para gobernar y regular el uso del territorio.

Los cambios en temperatura y precipitación identificados en los Andes peruanos tienen efectos en las estrategias productivas como uso de riego y diversificación de cultivos. Sin embargo, estas relaciones se ven acicateadas por otros procesos como la integración a la economía mercantil, la expansión de las vías de comunicación (y comercio), las reconfiguraciones sociodemográficas de los hogares rurales de la sierra peruana, y procesos de concentración de tierras y acceso al agua.

Existen procesos socio-económicos (i.e., no climáticos) que vienen ocurriendo desde hace siglos en los Andes peruanos y cuyos efectos son tan o más negativos que los del cambio climático. La minería es un caso relevante de proceso no-climático, al menos, por la proliferación de operaciones (de distinto tamaño y grado de formalidad), la extensión de sus efectos (positivos y negativos), y los niveles de tensión social que suscita.

En esta sucinta reflexión, hemos mostrado que los Andes peruanos están doblemente expuestos, a los efectos independientes que procesos climáticos y no-climáticos generan, y a las consecuencias de las interacciones sinérgicas entre ambos. Por ejemplo, en la puna altoandina se conjugan el cambio de uso del suelo (para ganadería, agricultura, y forestería) y el cambio climático, disminuyendo la capacidad regulatoria de esos ecosistemas sobre los flujos superficiales y alterando la fertilidad del suelo. A su vez, las modificaciones de la temperatura y la precipitación habilitan o limitan actividades como la agricultura y la ganadería, y las dinámicas de especies (vegetales y animales) y ecosistemas.

Todos los efectos del cambio climático independientes o en conjunción con los prevalentes procesos socio-económicos tendrán impactos en los grupos humanos que habitan y constituyen los territorios de la sierra peruana, con mayor gravedad para los grupos más vulnerables como los campesinos indígenas, los pequeños agricultores, y los pobres y marginales de las urbes de los Andes. Es la sobrevivencia de estos grupos y de su dinámica cultura —la cultura andina— la que debería estar en el centro de nuestra reflexión, acciones, estrategias y políticas públicas.

Referencias

Aguilar-Lome, J., Espinoza-Villar, R., Espinoza, J. C., Rojas-Acuna, J., Willems, B. L., & Leyva-Molina, W. M. (2019),

- May). Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000-2017) [Article]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.013>
- Aide, T. M., Grau, H. R., Graesser, J., Andrade-Nuñez, M. J., Aráoz, E., Barros, A. P., Campos-Cerqueira, M., Chacon-Moreno, E., Cuesta, F., Espinoza, R., Peralvo, M., Polk, M. H., Rueda, X., Sanchez, A., Young, K. R., Zarbá, L., & Zimmerer, K. S. (2019). Woody vegetation dynamics in the tropical and subtropical Andes from 2001 to 2014: Satellite image interpretation and expert validation. *Global Change Biology*, 25(6), 2112-2126. <https://doi.org/10.1111/gcb.14618>
- Anderson, E. P., Marengo, J., Villalba, R., Halloy, S., Young, B. E., Cordero, D., Gast, F., Jaimes, E., & Ruiz, D. (2011). Consequences of climate change for ecosystems and ecosystem services in the tropical Andes. In S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jorgensen, & H. Tiessen (Eds.), *Climate change and biodiversity in the tropical Andes* (pp. 1-18). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the environment (SCOPE).
- Baraer, M., McKenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., Gomez, J., Knox, S., & Fortner, S. K. (2015). Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: a multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 29(11), 2561-2581.
- Bebbington, A. (Ed.). (2007). *Minería, movimientos sociales y respuestas campesinas: Una ecología política de transformaciones territoriales*. IEP, CEPES.
- Bebbington, A., & Williams, M. (2008). Water and Mining Conflicts in Peru. *Mountain Research and Development*, 28(3/4), 190-195. <https://doi.org/10.1659/mrd.1039>
- Bebbington, A. J., Bebbington, D. H., Sauls, L. A., Rogan, J., Agrawal, S., Gamboa, C., Imhof, A., Johnson, K., Rosa, H., & Royo, A. (2018). Resource extraction and infrastructure threaten forest cover and community rights. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), 13164-13173.
- Bebbington, A. J., & Bury, J. T. (2009, October 13, 2009). Institutional challenges for mining and sustainability in Peru. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(41), 17296-17301. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906057106>
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756. <Goto ISI://000238452800042 (NOT IN FILE)
- Brain, K. A. (2017, Apr). The impacts of mining on livelihoods in the Andes: A critical overview [Review]. *Extractive Industries and Society-an International Journal*, 4(2), 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.03.001>
- Brush, S. B. (1976). Man's use of an Andean ecosystem. *Human Ecology*, 4(2), 147-166.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: climate change and Andean Society*. Oxford University Press, USA.
- Castillo, G., & Brereton, D. (2018, Apr). The country and the city: Mobility dynamics in mining regions [Article]. *Extractive Industries and Society-an International Journal*, 5(2), 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.02.009>
- Castro Salvador, S. (2013). *Pobreza, minería y conflictos socioambientales en el Perú*. INTE-PUCP.
- Chapin III, F. S., Folke, C., & Kofinas, G. P. (2009). A framework for understanding change. In F. S. Chapin III, G. P. Kofinas, & C. Folke (Eds.), *Principles of ecosystem stewardship: resilience-based natural resource management in a changing world* (pp. 3-28). Springer Verlag.
- Cuesta, F., Llambí, L. D., Huggel, C., Drenkhan, F., Gosling, W. D., Muriel, P., Jaramillo, R., & Tovar, C. (2019). New land in the Neotropics: a review of biotic community, ecosystem, and landscape transformations in the face of climate and glacier change. *Regional Environmental Change*, 19, 1623-1642.
- Dangles, O., Rabatel, A., Kraemer, M., Zeballos, G., Soruco, A., Jacobsen, D., & Anthelme, F. (2017). Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the tropical Andes. *PLoS One*, 12(5), e0175814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175814>
- De Echave, J., Diez, A., Huber, L., Revesz, B., Ricard Lanata, X., & Tanaka, M. (2009). *Minería y conflicto social*. CBC, CIPCA, CIES, IEP.
- de Valenca, A. W., Vanek, S. J., Meza, K., Ccanto, R., Olivera, E., Scurrah, M., Lantinga, E. A., & Fonte, S. J. (2017, Jun). Land use as a driver of soil fertility and biodiversity across an agricultural landscape in the Central Peruvian Andes [Article]. *Ecological Applications*, 27(4), 1138-1154. <https://doi.org/10.1002/eap.1508>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018, Oct). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes [Article]. *Global and Planetary Change*, 169, 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L., & Haerberli, W. (2019, May). Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin [Article]. *Science of the Total Environment*, 665, 465-483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Duque, A., Stevenson, P. R., & Feeley, K. J. (2015). Thermophilization of adult and juvenile tree communities in the northern tropical Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34), 10744-10749. <https://doi.org/10.1073/pnas.1506570112>
- Earls, J. (2006). *La agricultura andina ante una globalización en desplome*. CISEPA - PUCP.
- Earls, J. (2009). Organización social y tecnológica de la agricultura andina para la adaptación al cambio climático en cuencas hidrográficas. *Tecnología y Sociedad*, 16(8), 13-32.
- Erickson, C. L. (1992). Prehistoric landscape management in the Andean highlands: Raised field agriculture and its environmental impact. *Population and Environment*, 13(4), 285-300.
- Fadrique, B., Báez, S., Duque, Á., Malizia, A., Blundo, C., Carilla, J., Osinaga-Acosta, O., Malizia, L., Silman, M., Farfán-Ríos, W., Malhi, Y., Young, K. R., Cuesta, C. F., Homeier, J., Peralvo, M., Pinto, E., Jadan, O., Aguirre, N., Aguirre, Z., & Feeley, K. J. (2018, 2018/11/14). Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0715-9>
- Fehren-Schmitz, L., Haak, W., Mächtle, B., Masch, F., Llamas, B., Tomasto Cagigao, E., Sossna, V., Schitteck, K., Isla Cuadrado, J., Eitel, B., & Reindel, M. (2014). Climate change underlies global demographic, genetic, and

- cultural transitions in pre-Columbian southern Peru. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(26), 9443-9448. <https://doi.org/10.1073/pnas.1403466111>
- Fisher, J. R. (1977). *Silver mines and silver miners in colonial Peru, 1776-1824*. University of Liverpool. Centre for Latin-American Studies.
- Fortner, S. K., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., Trierweiler, A., Baraer, M., Burns, P. J., & Munk, L. (2011). Elevated stream trace and minor element concentrations in the foreland of receding tropical glaciers. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1792-1801.
- Freeman, B. G., Scholer, M. N., Ruiz-Gutierrez, V., & Fitzpatrick, J. W. (2018). Climate change causes upslope shifts and mountaintop extirpations in a tropical bird community. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804224115>
- Gordon, R. P., Lautz, L. K., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Chavez, D., & Baraer, M. (2015, 2015/03/01/). Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 522, 628-644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.013>
- Guittard, A., Baraer, M., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Wigmore, O., Fernandez, A., Rapre, A. C., Walsh, E., Bury, J., & Carey, M. (2017). Trace-metal contamination in the glacierized Rio Santa watershed, Peru. *Environmental monitoring and assessment*, 189(12), 649.
- Heikkinen, A. (2017). Climate Change in the Peruvian Andes: A Case Study on Small-Scale Farmers' Vulnerability in the Quillcay River Basin. *Iberoamericana-Nordic Journal of Latin American and Caribbean Studies*, 46(1), 77-88.
- Larsen, T. H., Brehm, G., Navarrete, H., Franco, P., Gomez, H., Mena, J. L., Morales, V., Argollo, J., Blacutt, L., & Canhos, V. (2011). Range shifts and extinctions driven by climate change in the tropical Andes: Synthesis and directions. In S. K. Herzog, R. Martínez, P. M. Jorgensen, & H. Tiessen (Eds.), *Climate change and biodiversity in the tropical Andes* (pp. 47-64). Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the environment (SCOPE).
- Leichenko, R., & Silva, J. A. (2014). Climate change and poverty: vulnerability, impacts, and alleviation strategies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(4), 539-556.
- Leichenko, R. M., & O'Brien, K. L. (2008). *Environmental change and globalization: Double exposures*. Oxford University Press.
- Leichenko, R. M., & O'Brien, K. L. (2019). *Climate and society: transforming the future*. Polity.
- Lennox, E. (2015, Jul). Double Exposure to Climate Change and Globalization in a Peruvian Highland Community [Article]. *Society & Natural Resources*, 28(7), 781-796. <https://doi.org/10.1080/08941920.2015.1024364>
- Liu, J. G., Dietz, T., Carpenter, S. R., Folke, C., Alberti, M., Redman, C. L., Schneider, S. H., Ostrom, E., Pell, A. N., Lubchenco, J., Taylor, W. W., Ouyang, Z. Y., Deadman, P., Kratz, T., & Provencher, W. (2007, Dec). Coupled human and natural systems. *Ambio*, 36(8), 639-649. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[639:chans\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[639:chans]2.0.co;2)
- Mark, B. G., Bury, J., McKenzie, J. M., French, A., & Baraer, M. (2010). Climate Change and Tropical Andean Glacier Recession: Evaluating Hydrologic Changes and Livelihood Vulnerability in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 794 - 805. <http://www.informaworld.com/10.1080/00045608.2010.497369% March 10, 2011>
- Mark, B. G., French, A., Baraer, M., Carey, M., Bury, J., Young, K. R., Polk, M. H., Wigmore, O., Lagos, P., Crumley, R., McKenzie, J. M., & Lautz, L. (2017). Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 159, 61-76.
- Moseley, M. E. (2001). *The Incas and their ancestors. The archaeology of Peru* (2 ed.). Thames and Hudson.
- O'Brien, K., Eriksen, S., Nygaard, L. P., & Schjolden, A. (2007). Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate policy*, 7(1), 73-88.
- O'Brien, K. L., & Leichenko, R. M. (2000). Double exposure assessing the impacts of climate change within the context of economic globalization. *Glob. Environ. Change*, 10, 221.
- O'Brien, K. L., & Leichenko, R. M. (2003, 2003/03/01). Winners and Losers in the Context of Global Change. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1), 89-103. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.93107>
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., & Nygaard, L. (2004). Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change*, 14(4), 303-313.
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bievre, B., Celleri, R., Crespo, P., Villacis, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazon, M., Gualpa, M., Gil-Rios, J., Fuentes, P., Olaya, D., Vinas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016, Oct). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments [Article]. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074-4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Ostrom, E. (2009, Jul). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Patel, R., & Moore, J. W. (2017). *A history of the world in seven cheap things: a guide to capitalism, nature, and the future of the planet*. University of California Press.
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94-103.
- Ponce, C., Arnillas, C. A., & Escobal, J. (2015). Cambio climático, uso de riego y estrategias de diversificación de cultivos en la sierra peruana. In J. Escobal, R. Fort, & E. Zegarra (Eds.), *Agricultura peruana: nuevas miradas desde el Censo Agropecuario* (pp. 172-223). GRADE.
- Postigo, J. C. (2013). Adaptation of Andean Herders to Political and Climatic Changes. In L. R. Lozny (Ed.), *Continuity and Change in Cultural Adaptation to Mountain Environments* (Vol. 7, pp. 229-258). Springer https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5702-2_9
- Postigo, J. C. (2014). Perception and Resilience of Andean Populations Facing Climate Change. *Journal of Ethnobiology*, 34(3), 383-400.

- Postigo, J. C. (2021). Navigating Capitalist Expansion and Climate Change in Pastoral Social-Ecological Systems: Impacts, Vulnerability and Decision-Making. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 52, 68-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.07.002>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Caceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., V, F., V, J., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Menegoz, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., & Wagnon, P. (2013). Current state of glacier in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81-102.
- Ramirez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A., & Arnillas, C. A. (2014). Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22(5), 391-404.
- Redford, K. H., & Adams, W. M. (2009). Payment for Ecosystem Services and the Challenge of Saving Nature. *Conservation Biology*, 23(4), 785-787. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01271.x>
- Rojas, T. V., Quincey, D., Rau, P., Horna-Muñoz, D., & Abad, J. (2021). Adapting to receding glaciers in the tropical Andes. *EOS*, 102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021EO210525>
- Rolando, J. L., Dubeux, J. C. B., Ramirez, D. A., Ruiz-Moreno, M., Mares, V., Turin, C., Sollenberger, L. E., & Quiroz, R. (2018). Land Use Effects on Soil Fertility and Nutrient Cycling in the Peruvian High-Andean Puna Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*.
- Sandor, J. A., & Homburg, J. A. (2017, Jul). Anthropogenic soil change in ancient and traditional agricultural fields in arid to semiarid regions of the Americas [Article]. *Journal of Ethnobiology*, 37(2), 196-217. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-37.2.196>
- Schitteck, K., Forbriger, M., Machtle, B., Schabitz, F., Wennrich, V., Reindel, M., & Eitel, B. (2015). Holocene environmental changes in the highlands of the southern Peruvian Andes (14 degrees S) and their impact on pre-Columbian cultures [Article]. *Climate of the Past*, 11(1), 27-44. <https://doi.org/10.5194/cp-11-27-2015>
- Seimon, T. A., Seimon, A., Daszak, P., Halloy, S. R. P., Schloegel, L. M., Aguilar, C., Sar, A., Sowell, P., Hyatt, A. D., Konecky, B., & Simmons, J. (2007). Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Global Change Biology*, 13, 288-299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01278.x>
- Somers, L. D., Gordon, R. P., McKenzie, J. M., Lautz, L. K., Wigmore, O., Glose, A., Glas, R., Aubry-Wake, C., Mark, B., Baraer, M., & Condom, T. (2016). Quantifying groundwater-surface water interactions in a proglacial valley, Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 30(17), 2915-2929. <https://doi.org/10.1002/hyp.10912>
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G.-H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraer, M., & Silva, Y. (2019). Groundwater Buffers Decreasing Glacier Melt in an Andean Watershed—But Not Forever. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13016-13026. <https://doi.org/10.1029/2019gl084730>
- Tejedor Garavito, N., Álvarez, E., Arango Caro, S., Araujo Murakami, A., Blundo, C., Boza Espinoza, T. E., La Torre Cuadros, M. A., Gaviria, J., Gutiérrez, N., & Jorgensen, P. M. (2012). Evaluación del estado de conservación de los bosques montañosos en los Andes tropicales. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2).
- Thomas, K., Hardy, R. D., Lazrus, H., Mendez, M., Orlove, B., Rivera-Collazo, I., Roberts, J. T., Rockman, M., Warner, B. P., & Winthrop, R. (2019). Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. *WIREs Climate Change*, 10(2), e565. <https://doi.org/10.1002/wcc.565>
- Thompson, L. G., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Beaudon, E., Porter, S. E., Kutuzov, S., Lin, P. N., Mikhaleenko, V. N., & Mountain, K. R. (2017, Dec). Impacts of Recent Warming and the 2015/2016 El Niño on Tropical Peruvian Ice Fields [Article]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 122(23), 12688-12701. <https://doi.org/10.1002/2017jd026592>
- Thompson, L. G., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Porter, S. E., Valdivia Corrales, G., Shuman, C. A., & Tucker, C. J. (2021, 2021/08/01/). The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records. *Global and Planetary Change*, 203, 103538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103538>
- Tito, R., Vasconcelos, H. L., & Feeley, K. J. (2018, Feb). Global climate change increases risk of crop yield losses and food insecurity in the tropical Andes [Article]. *Global Change Biology*, 24(2), E592-E602. <https://doi.org/10.1111/gcb.13959>
- Tovar, C., Arnillas, C. A., Cuesta, F., & Buytaert, W. (2013). Diverging responses of tropical Andean biomes under future climate conditions. *PLoS One*, 8(5), e63634.
- Vergara, W., Deeb, A. M., Valencia, A. M., Bradley, R. S., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A., & Haeussling, S. M. (2007). Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 88(25), 261-263.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., & Timm, O. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-science reviews*, 176, 195-213.
- Wilbanks, T. J., & Kates, R. W. (2010). Beyond Adapting to Climate Change: Embedding Adaptation in Responses to Multiple Threats and Stresses. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 719 - 728. <http://www.informaworld.com/10.1080/00045608.2010.500200%3B%20March%2010%202011>
- Young, K. R. (2009, 2009/09/28). Andean land use and biodiversity: humanized landscapes in a time of change. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 96(3), 492-507. <https://doi.org/10.3417/2008035>
- Young, K. R., Ponette-Gonzalez, A. G., Polk, M. H., & Lipton, J. K. (2017). Snowlines and Treelines in the Tropical Andes [Article]. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 429-440. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1235479>
- Zimmer, A., Meneses, R. I., Rabatel, A., Soruco, A., Dangles, O., & Anthelme, F. (2018, 2018/02/01/). Time lag between glacial retreat and upward migration alters tropical alpine communities. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 30, 89-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.05.003>

Los Glaciares de Rocas en la Cordillera del Centro de Chile

Rock Glaciers in the Cordillera of Central Chile

Cedomir Marangunic D.¹

¹ Geoestudios, Santiago, Chile

Resumen

En Chile, con glaciares de rocas desde la frontera con Perú hasta el extremo austral, hay más de medio siglo de experiencia en el estudio de estas geoformas. Se muestra aquí resultados de cerca de 30 años de estudio y monitoreo de glaciares de rocas en la cordillera del centro de Chile, en las cuencas del río Aconcagua y la subcuenca del río Mapocho. La experiencia muestra que, actualmente, glaciares cubiertos se están transformando en glaciares de rocas como resultado de sucesivos balance masa negativos de glaciares cubiertos ubicados en sectores donde el aporte de material detrítico caído sobre el glaciar desde laderas abruptas e incluido en avalanchas de nieve es significativo; de manera que estos glaciares de rocas no se derivan de procesos asociados a la formación de suelos helados (o permafrost). Los resultados de más de 100 sondajes en glaciares de rocas muestran que se trata de glaciares temperados, aunque en la cabecera de algunos, a cotas elevadas, podría existir hielo frío y, por ello, ser glaciares politérmicos. En todos los glaciares se ha encontrado un nivel freático variable, alto en verano (en casos especiales hasta cerca de la superficie), y bajo en invierno cuando se satura solo el 15% a 30% de la parte más profunda del glaciar. Los balances de masa son, en general, negativos, con tasas de fusión del hielo bajo la cubierta superficial de detritos del orden de 15 cm/a, de los cuales aproximadamente el 3% al 6% es fusión en la base del glaciar debido al calor geotérmico y al calor de fricción del glaciar sobre su lecho. Las velocidades de movimiento de los glaciares de rocas, en superficie, son, básicamente, inferiores a 1 m/a y, por lo general, están en el rango de 0.2 a 0.5 m/a. Aproximadamente la mitad de esta velocidad corresponde a deslizamiento basal. Los glaciares exhiben frentes por lo general estables, pero se reducen en cota en la medida en que pierden hielo. Se ha generado un modelo que simula correctamente las características y el comportamiento de los glaciares de rocas y se está avanzando en la adecuada evaluación de la estabilidad de estas masas de hielo con detritos y del riesgo asociado a eventuales deslizamientos catastróficos.

Palabras clave: *Glaciares de roca, glaciares cubiertos, cordillera, Chile, modelamiento*

Abstract

In Chile, with rock glaciers extending from the border with Peru to the southern tip, there is more than half a century of experience in the study of these geoforms. Here we show results of nearly 30 years of study and monitoring of rock glaciers in the Andes of central Chile, in the Aconcagua river basins and the Mapocho river sub-basin. Experience shows that, currently, covered glaciers are transforming into rock glaciers as a result of successive negative mass balances of covered glaciers located in sectors where the contribution of detrital material fallen on the glacier from steep slopes and included in snow avalanches is significant, so that these rock glaciers are not derived from processes associated with the formation of frozen soils (or permafrost). The results of more than 100 drillings in rock glaciers show that they are temperate glaciers, although at the head of some, at high levels, there could be cold ice and, therefore, they could be polythermic glaciers. A variable water table has been found in all glaciers, high in summer (in special cases close to the surface), and low in winter when they are saturated in only 15% to 30% of the deepest part of the glacier. Mass balances are generally negative, with ice melt rates under the debris surface cover on the order of 15 cm/yr, of which approximately 3% to 6% is melt at the base of the glacier due to geothermal heat and frictional heat from the glacier on its bed. The speeds of movement of rock glaciers, on the surface, are basically less than 1 m/a and are generally in the range of 0.2 to 0.5 m/a. Approximately half of this velocity corresponds to basal glide. The glaciers exhibit generally stable fronts, but they are reduced in elevation to the extent that they lose ice. A model has been generated that correctly simulates the characteristics and behavior of rock glaciers and progress is being made in the adequate evaluation of the stability of these masses of ice with debris and the risk associated with eventual catastrophic landslides.

Keywords: *Rock glaciers, covered glaciers, mountain ranges, Chile, modeling*

Introducción

Aspectos Generales de los Glaciares de Rocas

El glaciar de rocas es una masa de detritos angulosos, con forma de lóbulos o de lengua, que se mueve lentamente pendiente abajo debido a la deformación de hielo presente bajo la superficie, o debido a la deformación de sedimentos ricos en hielo. También, se considera glaciar de rocas la masa sin movimiento, en que el hielo persiste solamente en una matriz clasto soportada. Esta definición recoge las ideas de van Everdingen (2005), Cogley et al. (2011), Ballantyne (2017), de los manuales de UNESCO (1970) y GLIMS (Rau et al., 2005) y de varios otros autores. El hielo ocurre como un núcleo de hielo macizo con algunas intercalaciones de detritos, o como lentes de hielo en una masa de detritos y hielo, o como una matriz de hielo ocupando el espacio entre los clastos de rocas. La superficie del glaciar de rocas presenta una cobertura completa, o casi completa, de detritos rocosos. El movimiento pendiente abajo se produce por la deformación del hielo en el núcleo, o en los lentes, bajo la carga del propio hielo y del detrito que contiene (Barsch, 1992), y lo demuestra la presencia de cordones y surcos transversales (ver Figura 1) en la superficie del glaciar de rocas (Capps, 1910). Pero si el hielo se encuentra solamente de manera intersticial, como un cemento de hielo, y toda la carga es soportada por los clastos de rocas en contacto entre sí, el glaciar no se deforma.

El origen de los glaciares de rocas ha sido, y sigue siendo, un tema de discusión interminable (Berthling, 2011; Colucci et al., 2019). Para algunos (por ejemplo, Haerberli, 1985; Barsch, 1996) el hielo de los glaciares de rocas proviene de permafrost (o suelo helado) supersaturado de hielo. Para otros (por ejemplo, Whalley y Martin, 1992; Giardino et al., 2011) los glaciares de rocas son glaciares que fueron “blancos”, ubicados en nichos en la alta montaña, con abruptos farallones en sus cabeceras desde los cuales caídas de rocas y avalanchas que alcanzan el glaciar lo han ido cubriendo de detritos rocosos, además de detritos del interior del glaciar que quedan

expuestos por la fusión del hielo. De modo que, como dice la Dirección General de Aguas (2022) en Chile, un glaciar de rocas puede ser de origen glacial o “glacigénico”, con un núcleo de hielo macizo, o de origen “criogénico” o “periglacial” con estructura interna hielo-cementada (hielo intersticial).

Así, es un hecho que existen glaciares de rocas de ambos orígenes: (a) glaciares de rocas que se derivan de glaciares “blancos” (glaciares cubiertos) que se han ido cubriendo de detritos debido a balances de masas negativos y suficientes aportes a la superficie de detritos rocosos, y debido a lo cual su interior es esencialmente un núcleo de hielo, y (b) glaciares de rocas que se originan por el congelamiento de agua en suelo sometido a bajas temperaturas de manera que el hielo se encuentra esencialmente como la matriz entre clastos, y donde también se pueden formar ocasionales lentes de hielo.

La experiencia de Geostudios en la exploración del permafrost en la cordillera del centro de Chile y en Argentina, con campañas de numerosos pozos y mediciones de temperatura, indica que el permafrost discontinuo comienza a aparecer donde la MAAT (temperatura media anual del aire) es igual a, o por debajo de, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (en pendientes de aspecto al sur) y el permafrost se hace continuo donde la MAAT es igual a o por debajo de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto implica cotas del orden de 4220 a 4320 m s.n.m. para el límite inferior del permafrost discontinuo y dependiendo de la gradiente de temperatura empleada, y del orden de 4630 a 4850 m s.n.m. para la aparición del permafrost continuo. Considerando que criofomas del tipo glaciar de rocas se han mapeado a cotas tan bajas como 3100 m s.n.m., es evidente que estas no se relacionan con la ocurrencia de permafrost. Por lo demás, todos los glaciares de rocas hasta ahora mapeados en Chile se encuentran en áreas que, durante las glaciaciones cuaternarias estuvieron cubiertas por glaciares de montaña o de valle que fueron “blancos”, o por campos de hielo.



Figura 1. Aspecto de un típico glaciar de rocas, con cordones (bandas de compresión) transversales arqueados hacia el frente en la dirección del flujo. Foto: Alan Warren.

El glaciar de rocas, esta masa de hielo y detritos, independientemente de su origen, fluiría mientras exista hielo (núcleo, lentes, o hielo con detritos dispersos) en condiciones de sufrir la carga de hielo y detritos sobreimpuestos, y se deformaría obedeciendo a la ley de flujo del hielo. Dejará de fluir cuando el hielo se encuentre solamente en la matriz de una masa de detritos, mientras toda la carga sobreimpuesta es soportada por los clastos en contacto entre ellos. La velocidad de flujo dependerá de la carga hielo y detritos, la pendiente y la temperatura del glaciar: de hielo frío (con temperatura inferior a 0 °C) y con su lecho congelado y sin deslizamiento, o glaciar de hielo temperado (esencialmente a la temperatura de fusión) con agua en el lecho y deslizamiento basal.

De lo anterior se desprende que existen glaciares de rocas activos, porque hay hielo cargado que se deforma (un núcleo de hielo, o lentes de hielo, o el hielo con detritos dispersos en su interior). Y también existen glaciares de rocas inactivos, porque el hielo se encuentra ya solo como la matriz, o como parte de la matriz, en una masa que es clasto-soportada y en la cual el hielo no recibe carga y no se deforma.

El calificar glaciares de rocas sin hielo (o con muy escaso hielo) remanente en su interior, y sin movimiento en los últimos siglos, como “glaciares relictos” (IPA Action Group, RGIK 2021), es un error. Si se encuentra una crioforma que no contiene hielo, NO ES GLACIAR; es un depósito originado por un glaciar pre-existente. Menos aún debe incluirse estos relictos en un inventario de glaciares, uno de cuyos propósitos es el de conocer los volúmenes de hielo actualmente presentes en una cuenca. Estos depósitos, sin hielo, podrían denominarse morrenas relicto.

Glaciares de Rocas vs. Glaciares Cubiertos

Por otra parte, un glaciar cubierto es un glaciar que presenta más de un 10% y hasta un 100% de cobertura de detritos en su zona de ablación (Rau et al., 2005).

Según lo anterior, toda la Zona de Acumulación de un glaciar cubierto está libre de detritos. En una secuencia de años secos, con escasa o nada de neviza persistente de un verano a otro, algo de detritos podría encontrarse cubriendo tenuamente también partes de la Zona de Acumulación. Lo que hace la diferencia entre un glaciar descubierta (total o casi totalmente libre de detritos en su superficie) y un glaciar cubierto es el suministro de detritos a la superficie del glaciar desde su entorno. El detrito puede llegar a la superficie del glaciar cubierto por caída desde los taludes por sobre el glaciar, incorporado en avalanchas de nieve que se depositan sobre el glaciar, puede ser detrito intra glaciar expuesto por la fusión del hielo que lo contiene, y puede ser detrito expulsado desde el interior del glaciar en fracturas de cizalle en compresión.

Por lo mismo, un glaciar cubierto se compone de un núcleo de hielo en toda su extensión, en parte cubierto en su Zona de Ablación y descubierta en su Zona de Acumulación. Además, tiene una morena basal que, normalmente, es desde menos de 1 m hasta algunos metros de espesor y que suele contener un 50% de detritos. Como establecer el límite entre las zonas de acumulación y de ablación suele ser dificultoso en glaciares de rocas y en glaciares cubiertos, sugiero se acepte el denominar glaciar cubierto a aquel que tiene hasta el 90% de su superficie cubierta de detritos.

Glaciar de Rocas “Transicional”

El término “transicional” ha sido propuesto para utilizar en glaciares de rocas de movimiento muy lento, menos de un decímetro por año (RGIK, 2021), cercano a la detención total y cercano a lo que sería un glaciar inactivo o bien un “glaciar relicto”.

Como indicado más arriba, mientras exista hielo que sufre carga el glaciar se moverá con velocidades que dependen de la carga, la pendiente, la temperatura y la ley de flujo del hielo, y cesará de moverse cuando el hielo ya no recibe carga. Así, la velocidad de movimiento se reduce paulatinamente a cero. Pero, como virtualmente todo material en la superficie terrestre se deforma lentamente según su propia ley de flujo, y en particular los depósitos de materiales detríticos sin cohesión como lo son los abruptos taludes de talus en montaña, el problema es cuándo establecer que el movimiento que se observa en un depósito de material detrítico deja de ser causado por la deformación del hielo.

Mediciones de la velocidad de movimiento en taludes abruptos (de pendiente cercana a 36° o 37°, el ángulo límite estable) conformados por talus y atribuida a diversas causas pasivas y activas, indican que estos valores son inferiores a 10 cm/año (ver, por ejemplo, Rouyet et al., 2021). Nuestras propias mediciones en depósitos abruptos de talus cercanos a glaciares de rocas, pero libres de hielo, han resultado en velocidades algo inferiores a 10 cm/a. Esto nos permite aventurar que movimientos inferiores a ese valor, en glaciares de rocas, podrían ya no ser debidos a la deformación de hielo. En otras palabras, velocidades de movimiento superiores a 10 cm/año podría considerarse evidencia de un glaciar de rocas activo.

En un glaciar de rocas cercano a lo inactivo, con escasa presencia de hielo que sufre carga, un indicio de la presencia de hielo con pérdida de masa es la reducción de cota que se manifiesta y que puede ser del orden de algunos centímetros por año. El establecer esto requiere, desde luego medidas muy precisas que solo se logran con Estación Total (levantamiento geodésico) o empleando imágenes de alta resolución en levantamientos fotogramétricos. Adicionalmente, el frente abrupto es indicio habitual de actividad.

Protalus Rampart

La rampa protalus (“protalus rampart”) es una crioforma originada por detritos que deslizan sobre abruptas pendientes de nieve hasta descanzar al pie de la pendiente. A lo largo del tiempo, se forma un banco de material rocoso. Las rampas se suelen asociar a glaciares de rocas (ver Hedding, 2011) pero, en realidad, no tienen relación con ellos, más allá de encontrarse en similares ambientes geográficos.

En Chile la recomendación de la autoridad nacional que maneja el inventario de glaciares es que la rampa protalus debe incluirse en el inventario, si es que contiene hielo, de lo cual raramente hay evidencias en superficie, y también en caso de duda respecto a la presencia de hielo. En Chile se ha explorado en profundidad solo dos rampas. En una no se encontró hielo, y en la otra se encontraron indicios de hielo. Es probable que la mayoría de las rampas no contengan hielo (debido a su forma de origen y su ubicación), pero este es un tema que merece mayor investigación. En todo caso, la inclusión indiscriminada de todas las rampas en un inventario de glaciares, y dado que muchas probablemente no contienen hielo, produce un incremento artificial del volumen de hielo en la cuenca. No tenemos un criterio para diferenciar, a partir de una imagen, rampas con o sin hielo. Tal vez, uno podría ser el tamaño.

En un inventario de crioformas, no se debiera confundir rampas protalus con glaciares de rocas, independientemente del tamaño de estas formas. Las rampas suelen ser de menor superficie, pero también es común que varias de ellas se encadenen al pie de un talud, lo cual induce a mapearlas como una sola unidad de mayor tamaño.

El Estudio de Glaciares de Rocas en Chile

En Chile, un país donde glaciares de rocas existen desde las montañas en el límite con Perú hasta la cordillera en Tierra del Fuego, el extremo austral del continente, e incluso en la Antártica, se investiga a los glaciares de rocas desde más de 60 años, y una veintena de glaciares de rocas se monitorean permanentemente desde más veinte años. Considerando esto parece conveniente señalar las características esenciales de los glaciares de rocas en Chile, en particular los resultados del estudio de estos glaciares en la cordillera del centro de Chile, en la cuenca del río Aconcagua y en la subcuenca río Mapocho de la cuenca del río Maipo, a la latitud aproximada de 33°09'S, donde coexisten glaciares de rocas con glaciares cubiertos y descubiertos.

El estudio de los glaciares de rocas en la cordillera del centro de Chile ha comprendido, esencialmente, los siguientes temas y técnicas.

Área: empleando fotos aéreas que existen desde 1955 (fotos trimetrogon), imágenes satelitales, levantamientos

LiDAR y fotogrametría, y en años recientes con el empleo de imágenes obtenidas de vehículos aéreos no tripulados (UAV), las que permiten vuelos a baja altura e imágenes de excelente resolución.

Espesor: determinado a partir de sondajes hasta la base de varios glaciares, complementados con estimaciones obtenidas como resultados de exploraciones geofísicas empleando diversos métodos (sísmica, gravimetría, radar de penetración y perfiles de resistividad eléctrica).

Composición interna: conocida mediante sondajes con recuperación de testigos, pozos y zanjas, además de la ocasional exposición en bancos mineros.

Temperatura: del interior del glaciar, por sobre y por debajo del nivel de fluctuación anual, con sensores de temperatura insertados en perforaciones de sondajes y en pozos, y acoplados a registradores.

Conductividad térmica: del detrito que cubre los glaciares de rocas, empleando agujas térmicas en terreno, y mediante ensayos en laboratorio de muestras recolectadas en los glaciares.

Balance de masa en superficie: con técnicas glaciológicas (control de estacas en nieve, neviza o hielo, y de marcos de ablación en campos de penitentes), y técnicas geodésicas (cambio de cota de la superficie glaciar en un período de tiempo, estimada a partir de imágenes aéreas o satelitales adecuadamente georeferenciadas).

Balance de masa en la base: estimando la pérdida de masa por calor geotérmico (midiendo la gradiente de calor en antiguos sondajes sellados) y por el calor de fricción generado por el deslizamiento del glaciar sobre su lecho.

Balance de energía en la superficie: instalando estaciones meteorológicas automáticas, con sensores de temperatura, humedad y viento en tres niveles sobre el suelo o la nieve, neviza o hielo (para establecer gradientes verticales de estos parámetros), sensores de temperatura en la cubierta de detritos y en el hielo del glaciar, sensores de radiación de onda corta y el albedo, de la radiación en onda larga incidente y emitida, midiendo la conductividad térmica del detrito en la superficie del glaciar, y evaluando el efecto sobre la tasa de ablación del polvo depositado sobre superficies de nieve, neviza y hielo. Algunas de estas estaciones permiten la transmisión satelital de datos y el monitoreo permanente de los efectos sobre los glaciares de las variaciones en los parámetros meteorológicos. Varias estaciones están equipadas con “colchón de nieve” (“snow pillow”) para el registro de la acumulación nival y la densidad del manto de nieve.

Balance de agua: midiendo las variaciones de niveles de agua en sondajes en los glaciares, y midiendo la descarga desde los glaciares en puntos (generalmente aforos químicos) y en estaciones de aforo cercanas al frente. Los controles de niveles de agua en sondajes es difícil mantenerlos en el tiempo, pues el cable que transmite datos es muy vulnerable a la deformación del glaciar.

Velocidades de movimiento en superficie: se establece controlando el desplazamiento de puntos en

los glaciares medidos con Estación Total geodésica, y estimándola con la técnica de seguimiento de patrones geomorfológicos (“feature tracking”) en imágenes aéreas y satelitales de alta resolución. Inicialmente se controlaban con Estación Total al menos una docena de puntos por glaciar; actualmente se mantiene este control en terreno de tan solo 3 a 5 puntos por glaciar y el resto se evalúa con el empleo de imágenes de buena resolución y la técnica de “feature tracking”.

Velocidades de deformación y de deslizamiento en la base del glaciar: midiendo la deformación de pozos de sondajes, con inclinómetro insertado en sondajes entubados, y comparando esta deformación con las velocidades registradas en la superficie del glaciar sobre el punto de medición.

Esfuerzos en la superficie: midiendo la deformación de lados y diagonales de cuadriláteros (en “redes de hielo”), y también a partir de las velocidades medidas. Los numerosos datos de velocidades en un solo glaciar, provenientes de estimaciones con la técnica de “feature tracking” están haciendo obsoleta las mediciones en “redes de hielo”.

Variaciones de los glaciares: a partir de información histórica y reciente (esencialmente comparando la extensión de los glaciares en mapas e imágenes de diferente data), y estudios geomorfológicos.

Modelo computacional: desarrollo del modelo MDGR que simula el movimiento y balance de masa de un glaciar con cubierta de detritos de rocas. También el empleo de otros modelos, como el CRHM (Pomeroy et al., 2007) y sus versiones recientes para estimar el aporte hídrico de los glaciares de rocas a sus cuencas.

Riesgos: estudios centrados esencialmente en el peligro de la ocurrencia de deslizamiento catastrófico de glaciares. Estimación de la estabilidad de los glaciares empleando técnicas de la geomecánica y considerando la distribución de los materiales en el lecho (roca o til) y en el glaciar, sus propiedades geotécnicas, la temperatura interna de los glaciares de rocas, las condiciones de agua (especialmente el grado de saturación), la rugosidad primaria y secundaria del lecho, e incluyendo posibles aceleraciones sísmicas.

El lecho del glaciar: donde interesa establecer el tipo de materiales y sus características geotécnicas, las cuales han sido observadas en cortes del terreno por bancos mineros, excavaciones en márgenes de glaciares y en testigos de sondajes e imágenes captadas por cámara al interior de sondajes.

Glaciares artificiales: creados mediante el incremento artificial de la acumulación nival empleando vallas para nieve, y mediante la reubicación de masas de hielo glaciar a sitios previamente acondicionados. También pruebas de incremento y reducción artificial de las tasas de fusión, mediante la aplicación aérea y terrestre de diversos compuestos, y la cobertura de la superficie glaciar con detritos.

Resultados

Área del Glaciar

La superficie de los glaciares de rocas estudiados y que aquí se comentan, varía desde 1.3 a 49.6 ha. Debido a la cubierta de material detrítico que esconde el hielo del glaciar, suele constituir un problema el establecer los límites del glaciar en su cabecera, donde ya aparecen afloramientos de rocas cercanos, y en su frente, donde el glaciar concluye con un abrupto talud de material detrítico que se encuentra en el límite de reposo estable.

Las exploraciones han mostrado que en las cabeceras de los glaciares de rocas suele encontrarse hielo bajo el talud de detritos que se desprenden desde los afloramientos de rocas por encima de ellos (ver Figura 2), de manera que es conveniente buscar, en el terreno o en las imágenes que se analizan, evidencias de la presencia de hielo interno, considerando en esta tarea elementos tales como cambios de pendiente, de textura y de color del detrito, y de fractura o hundimiento del terreno. En todo caso, y a falta de mejor información, en la duda parece razonable suponer la presencia de hielo hasta la cercanía con los afloramientos rocosos ubicados en la cabecera del glaciar.



Figura 2. La exploración del talud detrítico por sobre la cabecera del glaciar, encontrando hielo, permitió trazar un nuevo límite del glaciar hasta casi alcanzar los afloramientos rocosos en la cabecera.

Un problema similar, el de donde colocar el límite de la presencia de hielo en el glaciar de rocas, se produce en la delimitación del frente del glaciar (Figura 3). Los glaciares de rocas activos se caracterizan por presentar un frente abrupto con material detrítico (talus grueso, sin cohesión) anguloso dispuesto en el ángulo límite de reposo estable de este material, del orden de 35° a 37°. El talus comienza a depositarse algunos metros (comúnmente de 5 m a 15 m) aguas abajo del inicio del frente abrupto del glaciar, y entre este inicio y el inicio del talus la pendiente del terreno suele ser algo mayor, de 39° a 45° y el terreno está constituida por material detrítico con finos y con algo de cohesión cuando seco. En este frente el hielo concluye algunos metros (4 a 5 m) aguas arriba del inicio del talud de talus.



Figura 3. El glaciar de rocas y su frente abrupto. El hielo, cubierto por detritos en hasta varios metros de espesor (comúnmente de 3 a 6 m) en el frente del glaciar, termina algunos metros aguas arriba del inicio del talud de talus. Fuente: Marangunic, 2021.

Espesor

Debido a la constitución del glaciar de rocas, esta mezcla de hielo y detritos rocosos, es tremendamente difícil de explorar con técnicas geofísicas basadas en la reflexión o refracción de ondas (cuando no existen horizontes claros y cuando las propiedades de cada horizonte varían enormemente), o de cambios en la atracción gravitacional (que necesita el dato de densidad del material), y aún más difícil interpretar los resultados. Por ello, el único resultado cierto, con las técnicas actualmente disponibles, es el que resulta de la realización de un sondaje con obtención de testigos. Aún así la tarea es difícil, pues los sondajes requieren el empleo de un líquido de perforación cuando se encuentra roca, el que enfría el taladro, pero también derrite el hielo, haciendo difícil la recuperación

de testigos y requiriéndose para ello un muy cuidadoso balance entre la velocidad de rotación, la presión sobre la broca y la inyección de fluidos. A la fecha se han concluido algo más de 110 sondajes de exploración de los glaciares de rocas en el centro de Chile.

Para una estimación de la profundidad media del glaciar puede emplearse una fórmula paramétrica que relaciona área (A) con el espesor medio (H) del glaciar. Esta ecuación, derivada de los glaciares de rocas explorados en el centro de Chile, en su última revisión tiene la forma de:

$$H = 0,4918 * A^{0,2757} \text{ metros}$$

para el caso de glaciares aislados. En el caso de lenguas confluentes de glaciares de rocas pero que se mapean como glaciares diferentes, con espesores considerables, diferentes de cero, en el margen de contacto, el espesor medio que resulta de la ecuación anterior debe incrementarse en un 20% a 30%. La ecuación arriba señalada tiene coeficientes algo diferentes de aquella de Chen y Ohmura (1990), u otras como la de Bahr et al. (2015), establecidas esencialmente con datos de glaciares descubiertos y cubiertos. El ajustar esta ecuación es una tarea permanente, en particular debido a nueva información sobre como delimitar los glaciares de rocas (cambia su superficie) y nuevos antecedentes de espesor.

En el caso de los glaciares estudiados sus espesores medios varían desde 4 a 38 m, y el espesor máximo, establecido con sondaje, alcanza a 125 m.

Composición Interna

En la composición de todo glaciar de rocas (Ugalde et al., 2018) se distinguen tres grandes unidades: (a) la cubierta de detritos, (b) el núcleo con hielo y detritos y (c) la morrena basal, también con hielo. La cubierta de detritos (Figura 4) está compuesta esencialmente de bloques angulosos, con nada, o muy escasos, finos y se trata de un material sin cohesión excepto donde puede existir algo de finos. Su espesor aumenta desde la cabecera del glaciar, donde suele tener pocos o decenas de centímetros de espesor, hasta el inicio del frente abrupto donde suele alcanzar varios metros de espesor, normalmente 4 a 5 m, siendo 8 m el mayor espesor conocido. La conductividad térmica del material de la cubierta de detritos es del orden de 0.20 a 0,32 W/mK. En aquellos glaciares de rocas en que la cubierta de detritos no cubre la totalidad del glaciar, la superficie expuesta de nieve y/o hielo es menos de 6% del área total del glaciar.

El detrito que cubre los glaciares de rocas proviene esencialmente de las laderas del entorno, desde donde simplemente clastos que se desprenden de ellas, o que ruedan desde el talus al pie de los afloramientos rocosos, alcanzan el glaciar. También las avalanchas son un medio eficiente de transporte de detritos hacia el glaciar, pues suelen transportar del orden de 1% a 2% de material detrítico. Algo del material detrítico que conforma la

cubierta de detritos, en el sector del frente, proviene del material expulsado desde la base del glaciar a lo largo de planos de cizalle (ver bandas oscuras en el hielo de la Figura 4). El material más fino, y en parte el arenoso, proviene parcialmente del transporte eólico y puede tener un origen muy distante.

Todos los glaciares en que su composición interna ha sido explorada con sondajes (21 glaciares de rocas) han sido glaciares activos de manera que, y como se podía preveer, en todos ellos se encontró un núcleo de hielo con ocasionales lentes de detritos (con hielo en la matriz) y clastos aislados en la masa de hielo, o bien se encontró un núcleo compuesto de varios lentes de hielo esencialmente puro en una masa de detritos con matriz de hielo. El porcentaje de hielo en el núcleo del glaciar está, en general, cerca del 80%, el resto son los detritos rocosos. El menor porcentaje de hielo encontrado es de 62%.



Figura 4. La cubierta de detritos sobre el núcleo de hielo del glaciar de rocas Monolito, expuesta en una zanja de exploración. Fuente: Marangunic, 2010.

Considerando que la porosidad mínima de un material granular constituido por esferas poldispersas de diferentes tamaños, pero clasificadas, depositado gravitacionalmente y sujeto a cargas moderadas, es del orden de 0.32 a 0.34 (por ejemplo, Reboul et al., 2008), el porcentaje en volumen de hielo contenido en un glaciar de rocas activo es como mínimo del orden de 40%.

La morrena basal es la parte inferior del glaciar, aquella en que la base del glaciar está en contacto con su lecho y desde el cual el glaciar arranca material que incorpora a su masa. El espesor de esta morrena suele ser del orden de 2 m pero, en general, varía de 0.5 hasta 6 m. El contenido de detritos en la morrena basal varía grandemente, desde aproximadamente 20% hasta cerca del 60% en volumen; por lo general es cercano al 50% (Figura 5).



Figura 5. Aspecto de la morrena basal de un glaciar de rocas: rocas en una matriz de hielo translúcido, en proporción de ~ 50% y 50%.

Temperatura al Interior del Glaciar de Rocas, Densidad del Hielo y Agua

Desde el punto de vista de la temperatura del hielo al interior del glaciar, estos se clasifican en:

- **Hielo temperado:** $T = @$ punto fusión, aprox. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- **Hielo frío:** $T <$ punto fusión, bajo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- **Glaciar politérmico:** partes del glaciar con hielo frío y partes con hielo temperado. En general la parte del glaciar a mayor cota es fría, y aquella a menor cota es temperada.

Todos los glaciares de rocas estudiados son glaciares temperados, esencialmente a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, según resultados de las mediciones de temperatura en sondajes y pozos. Desde luego, y como en virtualmente todo glaciar, en invierno se introduce una onda de frío que suele alcanzar entre los 12 y 17 m de profundidad, onda que se disipa en los meses de verano. Considerando las cotas más elevadas en la cabecera de los glaciares de rocas, es posible que en algunas de éstas se encuentren condiciones de hielo frío (con temperaturas permanentemente por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), en cuyo caso el glaciar debiera definirse como politérmico, pero esta condición aún no se ha observado.

Como es común en glaciares temperados, todos ellos porosos y permeables, en todos los glaciares de rocas explorados con sondaje se han encontrado niveles freáticos. Estos varían desde muy cercanos a la superficie del glaciar en condiciones climáticas especiales, tales como la coincidencia de días veraniegos de altas temperaturas del aire y lluvias templadas (originando una alta tasa de fusión en superficie y un alto nivel freático), pero normalmente se encuentra a la cota de aproximadamente 50% al 70% de la máxima presión de poros. En los meses invernales, el nivel de agua desciende hasta saturar solamente del orden de 15% al 30% del volumen más inferior del glaciar.

Respecto a los flujos de agua en los glaciares de rocas, el agua originada en la fusión de nieve invernal en la superficie del glaciar, y aquella producida por la fusión de hielo bajo el detrito en la superficie del glaciar, escurre inicialmente por la base de la capa de detritos superficial sobre el núcleo con hielo del glaciar, infiltrándose en el hielo poroso y permeable del glaciar y es conducida a la base del glaciar por la red de drenaje interno del glaciar. El flujo subglacial es permanente, en cuanto parte de él se origina por la fusión del hielo en la base del glaciar, proceso de permanente ocurrencia.

La densidad del hielo en el interior de los glaciares de rocas, medida en testigos de sondajes y en muestras obtenidas de las paredes de pozos profundos, varía entre 0.82 y 0.90 g/cm³. El valor de 0.86 g/cm³ es el más común encontrado.

Balace de Masa y Energía

El balace de masa de los glaciares de rocas, tras varios años de monitoreo con técnicas glaciológicas que registran el descenso de la superficie del glaciar, medida en una estaca en la superficie (o como suele ser el caso en una tubería de sondaje, ver Figura 6), o bien como descenso de la cota de la superficie del glaciar (establecida por método geodésico, Figura 7), ha sido por lo general negativo y raramente de equilibrio. Medido en los diversos glaciares resulta en un valor medio anual de -0.15 m/a de hielo, del cual del orden de 3% a 6% es debido a la fusión del hielo en la base del glaciar (aproximadamente -0.006 a -0.010 m/a de hielo) ocasionada por el calor geotérmico y por el calor de fricción que genera el deslizamiento del glaciar sobre su lecho.

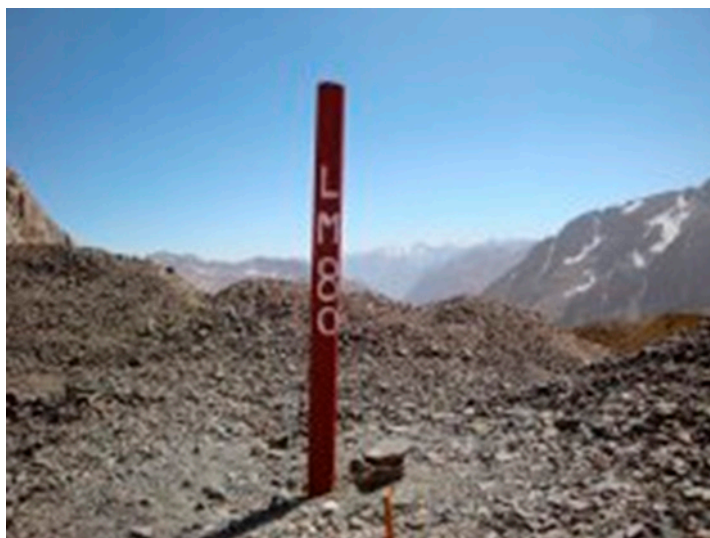


Figura 6. Descenso de la superficie del glaciar de rocas Monolito, medida en torno a un tubo de sondaje tras varios años de controles. Cuando se concluyó el sondaje, el año 1998, el tubo fue cortado a 10 cm sobre la superficie del glaciar.



Figura 7. Descenso de la cota de la superficie del glaciar de rocas Littoria en el período 2017-2018.

Fuente: Marangunic, Beriain y Ugalde, 2019.

Para evaluar el balance de energía en la superficie de un glaciar de rocas debe considerarse la presencia de dos interfaces, la de aire-detritos y la de detritos-hielo. El balance de energía en la superficie contempla flujos radiativos (radiación solar incidente y reflejada y de onda larga emitida) además de flujos turbulentos (calor latente y sensible). Por otra parte, en la capa de detritos existe un almacenamiento de energía y flujos por convección y conducción de energía que ocurre en el aire entre los detritos. En general, en la superficie de detritos que cubren los glaciares de rocas, la más significativa fuente de calor es, por lejos, la radiación solar incidente, según resulta de numerosas observaciones en estaciones meteorológicas automáticas.

Velocidades en Superficie y en la Base

Las velocidades en la superficie de los glaciares de rocas, medidas con instrumentos geodésicos y también estimadas según la técnica de seguimiento de patrones ("feature tracking") en dos imágenes consecutivas (Figura 8), varían por lo general de 0.2 a 0.5 m/a, siendo el valor más alto observado de 2.6 m/a en el glaciar de rocas Littoria. Sin embargo, las velocidades más altas raramente exceden de poco más de un metro por año.

Las velocidades de los meses de verano son de 29% a 74% mayores que las velocidades anuales. Si un glaciar es temperado, es decir, el hielo que lo constituye se encuentra a 0 °C, existe en él una importante presencia de agua que, infiltrándose en el hielo y escurriendo por la base del glaciar, facilita su deslizamiento. La mayor o menor presencia de agua en un glaciar influye críticamente en la velocidad de movimiento del glaciar, lo cual se refleja en las mayores velocidades de movimiento del glaciar en los meses de verano.

Las velocidades en la base de los glaciares de rocas, esencialmente el deslizamiento sobre su lecho, son del 38% al 57% de las velocidades medidas en superficie por sobre los puntos de las velocidades basales.

Como puede esperarse, las tensiones longitudinales son mayormente compresivas en la parte baja de los glaciares de rocas (la superficie a menor cota), y de tensión en las partes altas, de manera similar a como ocurre en los glaciares descubiertos y cubiertos.

En general, el flujo del glaciar de rocas puede ser modelado suponiendo que toda la deformación ocurre en el hielo presente en el núcleo y la morrena basal del glaciar, considerando la carga adicional que produce el detrito rocoso presente a las diferentes profundidades en que ocurre, y empleando la ecuación de flujo del hielo (Cuffey y Paterson, 2010) en que $B = 0.164$ y $n = 3$.

El Lecho del Glaciar

Afectaciones a glaciares de rocas producidos por la minería en Chile, en particular las excavaciones de bancos mineros, han permitido observar directamente las características del lecho de estos glaciares. El que los glaciares temperados descansan sobre un lecho que es en parte la roca basal y en parte cavidades que originalmente se pensaba llenas de agua pero que ahora se consideran depósitos til, proviene de discusiones dentro de cuyos principales autores destacan Weertman (1962, 1964) y Lliboutry (1965), y que posteriormente derivó en la idea de lechos deformables (Zoet e Iverson, 2020).

La apertura y luego operación del rajo Sur-Sur de la mina Andina de CODELCO-Chile permitió observar el lecho de los glaciares afectados, evidenciándose que aguas arriba de la posición de la Línea de Equilibrio de los glaciares el lecho del glaciar es 100% roca, como

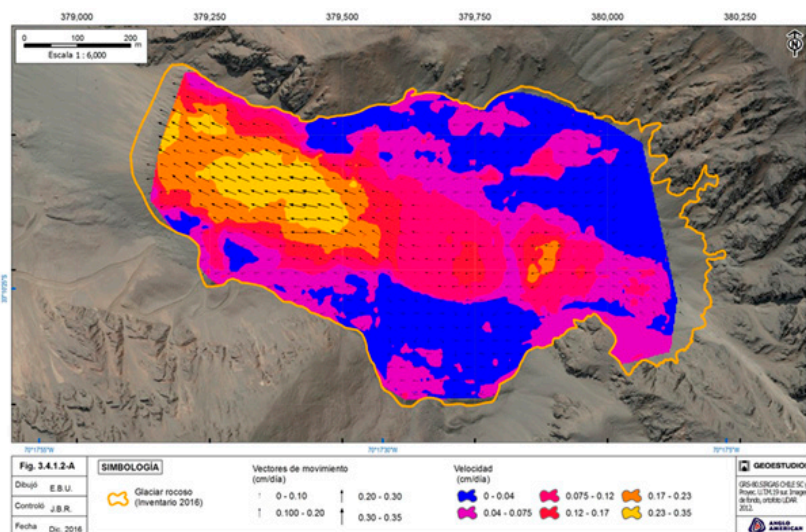


Figura 8. Velocidades en la superficie del glaciar de rocas Agua de los Machos, en cm/día, establecidas por comparación de imágenes de los veranos 2012 y 2016. Velocidades: azul = 0 a 0.04 cm/día, amarillo = 0.25 a 0.35 cm/día.

Fuente: Maragunic, Beriain y Ugalde, 2019.

se expresó (por Geoestudios) en el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Andina 244 el año 2013 (ver Tabla 1) que relaciona la pendiente del lecho con el porcentaje de afloramientos de rocas en el lecho del glaciar. Esta tabla se basa en numerosas observaciones de personal de Geoestudios en los bancos mineros que cortaron glaciares de rocas y glaciares cubiertos, todos ellos temperados, y en datos de Geoestudios y de terceros en sondajes en glaciares de rocas. Con esta tabla, y las observaciones de afloramientos de roca en el frente de numerosos otros glaciares, además de resultados de sondajes en glaciares, se ha confeccionado el gráfico (Figura 9) que relaciona la proporción de roca basal en lecho del glaciar desde el frente hasta lo que se puede suponer fue su Línea de Equilibrio previo a la transformación a glaciar de rocas. Para pendientes fuertes, sobre 60°, los datos son escasos y el gráfico tiene poco sustento.

Lo señalado por Geoestudios en cuanto a qué til se encuentra en el lecho de los glaciares aguas abajo de la posición de la Línea de Equilibrio (desde donde, en general, las velocidades de movimiento del glaciar disminuyen hasta el frente), concuerda y es coincidente con lo establecido por Van der Meer et. al. (2003) que indican que la reducción de velocidad, la presencia de agua y el contenido de partículas finas son los factores principales causantes de la depositación de til en el lecho de los glaciares. Desde luego, estas son condiciones que ocurren solamente en glaciares temperados, o en las zonas temperadas de glaciares politérmicos.

Variaciones

Las imágenes útiles de mayor antigüedad de los glaciares estudiados son aquellas del vuelo fotogramétrico

Tabla 1. Porcentaje de afloramientos de la roca (la diferencia es til) en el lecho de los glaciares de rocas observados en bancos del rajo de la mina Andina, y en materiales recuperados en sondajes en glaciares de rocas.

Pendiente del techo rocoso	Porcentaje de la base del glaciar en contacto con la roca basal
0° - 19°	Sin contacto con la roca basal
20° - 26°	10%
27° - 80°	50%
> 80°	75%
Zona de acumulación	100%

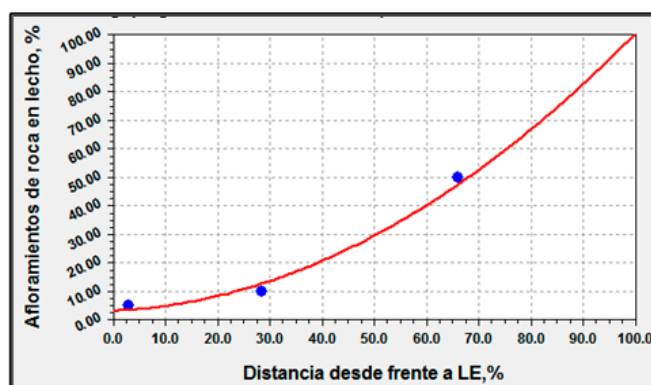


Figura 9. Proporción de afloramientos de roca en el lecho de un glaciar, según distancia desde el frente (distancia 0) del glaciar hasta su Línea de Equilibrio (distancia 100%).

HYCON del año 1955. Imágenes previas, aunque disponibles, muestran una cobertura nival tal que limita la posibilidad de ocuparlas. En general, en estas imágenes el frente de los glaciares de rocas ha permanecido estable en todos los glaciares salvo uno, el que muestra un leve avance ocurrido cuatro décadas atrás, y de magnitud de unos pocos metros en una parte del frente.

Lo notable en cuanto a variaciones es que dos actuales glaciares de rocas eran, en las imágenes aéreas del año 1955, glaciares cubiertos, vale decir glaciares con cobertura detrítica en solo parte o toda su Zona

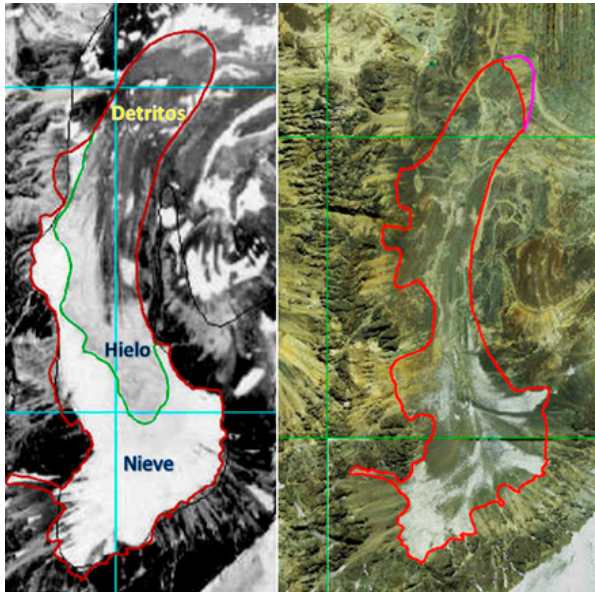


Figura 10. Variación del glaciar Rinconada Oeste. Límites del glaciar en línea roja. En la imagen de izquierda, fotografía aérea HYCON de marzo 1955, el glaciar se clasifica como cubierto, con línea de equilibrio en color verde, con nieve y neviza en la cabecera (la Zona de Alimentación, sector inferior de la fotografía), la cubierta de detritos en parte de la Zona de Ablación del glaciar y un sector gris – superficie de hielo – en esa misma zona. A la derecha, una imagen LiDAR de abril 2009, muestra nuevos límites (línea roja) con el glaciar reducido y una extensa cubierta de detritos que transforma al glaciar en glaciar de rocas.

de Ablación y que, debido a que la reducción del hielo ha dejado expuesta una mayor cantidad y extensión de detritos rocosos, los glaciares se han convertido en glaciares de rocas (Figura 10).

Esta transformación de glaciar cubierto no es única en Chile (ver, por ejemplo, Jones et al., 2019) y parece ser el camino natural de todos aquellos glaciares actualmente cubiertos que se ubican en una depresión de la montaña a donde arriban los abundantes detritos rocosos desprendidos desde las laderas de sus entornos, conformadas por afloramientos de rocas de pobre calidad geotécnica o desde extensos taludes conformados por depósitos de talus y suelos en general, dispuestos en el ángulo límite de inclinación estable.

Modelo Computacional

Hemos desarrollado un modelo computacional (Figura 11) denominado MDGR, que simula el comportamiento y las características de un glaciar de rocas. Como datos de entrada del modelo se requiere el mejor relieve subglaciar disponible, la estratigrafía en un punto alto del glaciar, y las condiciones climáticas con sus eventuales variaciones en el tiempo. El modelo se basa en el desplazamiento, pendiente abajo, de una columna de hielo y detritos que desliza por el relieve establecido. El modelo modifica año a año los espesores y la cota de superficie según la ablación calculada, y estima las velocidades (incluidas la deformación del hielo y el deslizamiento basal) año a año en la superficie del glaciar. La bondad del modelo se juzga comparando con la realidad la cota de la superficie del glaciar confeccionada por el modelo. También se juzga por la concordancia entre las velocidades de la superficie, medidas en el glaciar, con aquellas estimadas por el modelo.

Este modelo supone, de acuerdo a todo lo indicado más arriba, que los glaciares de rocas provienen de la degradación de glaciares cubiertos, que luego transitan a glaciares de rocas, como la experiencia de los estudios arriba señalados lo indica, y que ellos no se originan, ni se asocian, con geoformas provenientes de procesos relacionados con suelos helados, o permafrost.

Riesgos

El mayor riesgo asociado a la presencia de glaciares de rocas es la inestabilidad mecánica, y de manera similar a lo que ocurre con la presencia de glaciares descubiertos y cubiertos, una posible pérdida de estabilidad del glaciar mismo y su consecuente deslizamiento súbito y violento pendiente abajo, con catastróficos efectos sobre el entorno. La metodología para estimar la estabilidad, hasta ahora utilizada, proviene de la geotecnia, modificando los valores de los parámetros que caracterizan a las diversas unidades presentes para representar el hielo, las rocas y los depósitos sedimentarios. Como técnica parece adecuada, pero el problema radica en el conocimiento de las condiciones en cada glaciar. Debe modelarse el relieve del lecho y, más arriba, hemos visto las dificultades para obtenerlo. Más aun, un parámetro importante es el de las asperezas del lecho, que en la mayoría de los casos se suele desconocer. Muy importante es, también, el determinar las propiedades de los materiales que constituyen el lecho del glaciar, el que suele ser depósitos de til (una morrena de fondo) que cuando cargada por el glaciar y saturada tiene cohesión cercana a cero y muy bajo ángulo de fricción interna, o bien la roca basal en general de muy alta cohesión y alto ángulo de fricción interna. De la mayor relevancia en la determinación de la estabilidad es, también, la condición de agua en el glaciar y su lecho. Afortunadamente, este es un parámetro que puede estimarse y, mejor aún, monitorearse a partir de información proporcionado por sensores colocados al interior de uno o más sondajes en el glaciar.

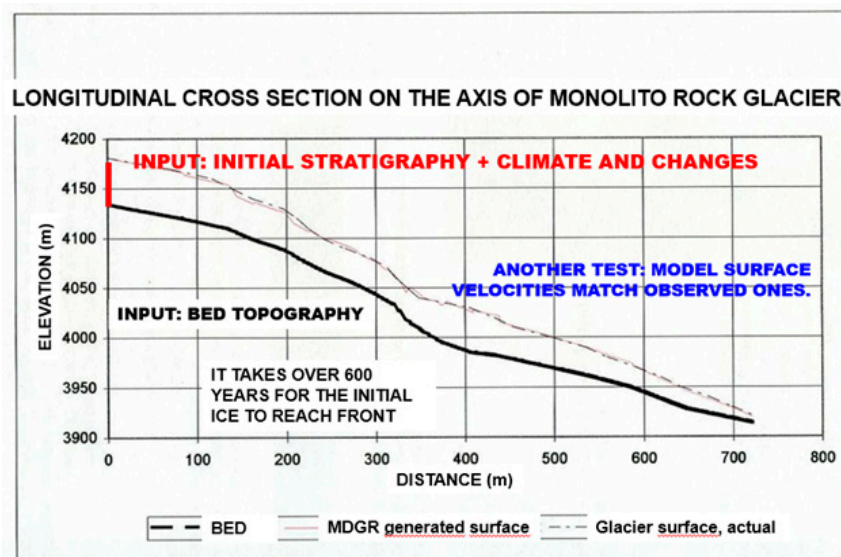


Figura 11. Perfil longitudinal del glaciar de rocas Monolito, generado por el Modelo MDGR a partir de una columna estratigráfica en su cabecera, comparado con la realidad actual; corriendo sobre un lecho de relieve determinado con exploración geofísica y sondajes. Fuente: Marangunic, Beriain y Ugalde, 2019.

Otros antecedentes requeridos para evaluar correctamente la estabilidad son: densidades de los materiales (requiere estimar proporciones de hielo y detritos), la temperatura en el interior y lecho del glaciar, y el fracturamiento en el núcleo con hielo, el que generalmente se encuentra enmascarado por la cubierta de detritos del glaciar de rocas.

Glaciares de Rocas Artificiales

Con la formación de glaciares de rocas artificiales se pretende acumular masas de hielo con una cubierta de detritos tal que reduzca significativamente la tasa de ablación del hielo de manera que esta acumulación persista en el tiempo cuanto sea deseable. Considerando que la tasa de ablación anual de los glaciares de rocas es del orden de

1/10 o 2/10 de la tasa de ablación de glaciares descubiertos, el generar glaciares de rocas podría mitigar el efecto de la acelerada extinción de los glaciares de superficie “blanca” como consecuencia del cambio climático.

Dentro de los estudios que aquí se describen, se ha realizado la prueba de trasladar una parte menor de un glaciar de rocas (aproximadamente 30,000 m³) a un sitio distante aproximadamente 2 km, donde se preparó una superficie de material detrítico de más conveniente calidad geoquímica y se cubrió el material trasladado con un manto de 2 m de espesor de material detrítico del entorno, evitando en este último la presencia de elementos resultantes de alteraciones hidrotermales de las rocas (ver Figura 12). El resultado fue que el material de glaciar de rocas que en su sitio original se



Figura 12. La camioneta descansa en la superficie del glaciar de roca artificial, de pendiente al suroeste. Sobresalen de la superficie postes para el control de la ablación, de 20 m de largo cada uno e insertados en el glaciar artificial mediante sondajes. Con los años el glaciar mostró flujo y la formación de grietas.

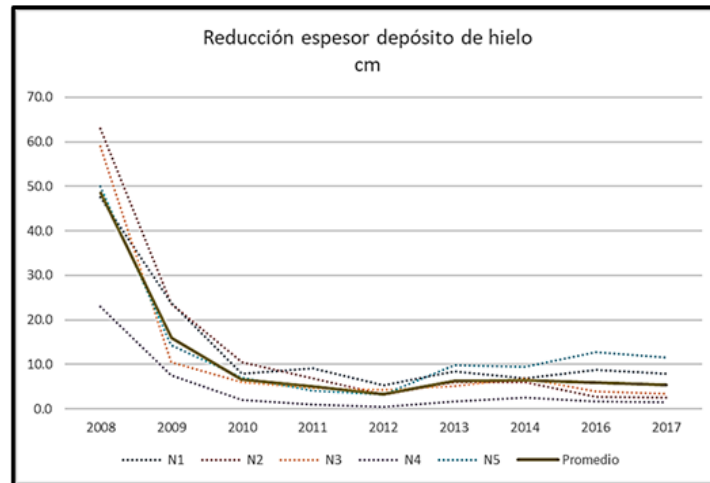


Figura 13. Tasa de ablación (cm/año) en la superficie del glaciar de rocas artificial desde su formación el año 2008. N1 a N5 son estacas de control insertadas en sondajes realizados hasta la base del depósito de hielo y detritos, por lo que registran la fusión del hielo bajo la cubierta superficial artificial de detritos, y también la fusión en la base del depósito.

estaba reduciendo a tasas de -12 a -15 cm/año de espesor de hielo, ya el tercer año (tras el natural proceso de compactación del hielo en el depósito) se reducía a tasas del orden de 4 a 5 cm/año (ver Figura 13). Vale decir, el hielo de este glaciar de rocas artificial persistiría tres veces más que el hielo del glaciar de rocas en su sitio original, desde el cual fue removido.

Los resultados de esta prueba muestran que es posible prolongar la vida de los glaciares, transformándolos en glaciares de rocas, y así conservar valiosos recursos hídricos.

Conclusiones

La experiencia derivada del estudio de glaciares de rocas en la cordillera del centro de Chile indica que ellos se originan por transformación desde glaciares cubiertos a glaciares de rocas en la medida que detritos rocosos se incorporan a la superficie del glaciar, de modo que estos glaciares no se relacionan con procesos asociados a la formación de suelos helados (o permafrost), sino con procesos relativos a la degradación de los taludes en sus entornos y la cantidad de material detrítico que llega y se deposita en la superficie glaciar. Los glaciares se componen de una cubierta de detritos de hasta algunos metros de espesor, de un interior que es una masa de hielo, aproximadamente 80% hielo y el resto detritos, y una morrena basal con aproximadamente 50% de hielo.

Se trata de glaciares mayormente de hielo temperado con presencia de niveles freáticos en su interior, aunque algunos de ellos, con sus cabeceras ubicadas a mayor cota, podrían ser politérmicos. Los balances de masa son, en general, negativos con tasas de fusión del orden de 15 cm/a de hielo (aproximadamente 12.9 cm de agua), de los cuales del orden de 3% a 6% es fusión en la base del glaciar por calor geotérmico y por el

calor generado por la fricción del glaciar sobre su lecho. La densidad del hielo es, en promedio, de 0.86 g/cm³. Balances de energía en la superficie de los glaciares de rocas muestran la radiación en onda corta (solar) como el principal agente meteorológico.

Se muestra una ecuación del tipo de potencia, que relaciona la extensión de la superficie del glaciar con su espesor medio, pero en el caso de lenguas de glaciares de rocas coalescentes, el espesor medio así estimado debiera ser mayor.

Las velocidades de movimiento en la superficie de los glaciares de rocas son, básicamente, inferiores a 1 m/a y, por lo general, están en el rango de 0.2 a 0.5 m/a. Aproximadamente la mitad de esta velocidad corresponde a deslizamiento basal, sobre un lecho que es parte til y parte roca en la parte inferior del glaciar y solo roca en la parte superior. Los glaciares exhiben límites por lo general estables, pero se reducen en cota a medida que pierden hielo.

Se ha generado un modelo que simula correctamente las características y el comportamiento de los glaciares de rocas, y se lo está traduciendo a un lenguaje de uso común. Se está avanzando en la correcta evaluación de la estabilidad mecánica de estas masas de hielo y del riesgo asociado a eventuales deslizamientos catastróficos, siendo factores significativos la propiedad geotécnica de los materiales del lecho, las condiciones de agua en el glaciar y las asperezas presentes en el lecho.

Se ha creado un glaciar artificial mediante acumulación artificial de nieve, y mediante el traslado de una parte menor de un glaciar de rocas a un sitio previamente acondicionado, logrando reducir significativamente la tasa de fusión en su sitio original con una cubierta de detritos más eficiente.

Referencias

- Bahr, D. B., Pfeffer, W. T. y Kaser, G. (2015). A review of volume-area scaling of glaciers. *Reviews of Geophysics*, 53(1), 95-140.
- Ballantyne, C. K. (2017). *Periglacial geomorphology*. Wiley-Blackwell.
- Barsch, D. (1992). Permafrost creep and rockglaciers. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(3), 175-188.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Berlin y Heidelberg, Springer.
- Berthling, I. (2011). Beyond confusión: Rock glaciers as cryo-conditioned landforms. *Geomorphology*, 131(3-4), 98-106.
- Capps, S. R. (1910). Rock glaciers in Alaska. *Journal of Geology*, 18(4), 359-375.
- Chen, J. y Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *Hydrology in mountain regions. I - Hydrological measurements; the water cycle*. IAHS Publication 193, pp. 127-135.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. y Zemp, M. (2011). *Glossary of glacier mass balance and related terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology, 86. París, UNESCO.
- Colucci, R. R., Forte, E., Žebre, M., Maset, E., Zanettini, C. y Guglielmin, M. (2019). Is that a relict rock glacier? *Geomorphology*, 330, 177-189.
- Cuffey, K. M. y Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers* (4a edición). Elsevier.
- Dirección General de Aguas (2022). Metodología detallada - glaciares rocosos. *Metodología del inventario Público de Glaciares* (minuta técnica 7), pp. 15-18. Santiago, Chile.
- Giardino, J. R., Regmi, N. R. y Vitek, J. D. (2011). Rock glaciers. En: Singh, V. P., Singh, P. y U.K. Haritashya, U.K. (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*, 943-948. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Haerberli, W. (1985). Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of Alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zurich*, 77, 1-142.
- Hedding, D. W. (2011). Pronival rampart and protalus rampart: A review of terminology. *Journal of Glaciology*, 57(206), 1179-1180.
- Jones, D. B., Harrison, S. y Anderson, K. (2019). Mountain glacier-to-rock glacier transition. *Global and Planetary Change*, 181.
- Lliboutry, L. (1965). *Traité de glaciologie*, Tome II. París, Masson et Cie.
- Marangunic, C. (2010). Glaciers in Chile's high mountain mine explorations and project planning. 4th International Conference on Mining Innovation MININ 2010, Santiago, Chile. *Proceedings*, 17-28.
- Marangunic, C. (2021). Discriminación entre glaciar cubierto y glaciar de rocas, e inventario de glaciares. Taller. Sociedad Chilena de la Criosfera.
- Marangunic, C., Beriain, E. y Ugalde, F. (2019). Rock glaciers in the central Andes (Chile). 1st Southern Hemisphere Conference on Permafrost, SOUTH COP 2019, Conference Handbook. Queenstown, New Zealand.
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J. y Carey, S. K. (2007). The cold regions hydrological model: A plataforma for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*, 21(19), 2650-2657.
- Rau, F., Mauz, F., Vogt, S., Singh Khalsa, S. J. y Raup, B. (2005). *Illustrated GLIMS glacier classification manual*. GLIMS Regional Center "Antarctic Peninsula". Alberts-Ludwigs-Universität Freiburg, Alemania, Institut für Physische Geographie.
- Reboul, N., Vincens, E. y Cambou, B. (2008). A statistical analysis of void size distribution in a simulated narrowly graded packing of spheres. *Granular Matter*, 10, 457-468.
- RGIK (2021). Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers: Baseline concepts (version 4.2.1.). IPA Action Group Rock Glacier Inventories and Kinematics (Ed.).
- Rouyet, L., Staalasen Lilleoren, K., Böhme, M., Vick, L. M., Delaloye, R., Etzelmüller, B., Lauknes, T. R., Larsen, Y. y Blikra, L. H. (2021). Regional morpho-kinematic inventory of slope movements in northern Norway. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.681088>
- Ugalde, F., C. Marangunic, J. Becerra (2018). Estructura interna y evolución del glaciar rocoso Littoria en el estero de Yerba Loca, Chile central. XV Congreso Geológico Chileno "Geociencias Hacia la Comunidad", Universidad de Concepción, 18 al 26 de noviembre. *Resúmenes*. Concepción, Chile.
- UNESCO. (1970). Perennial ice and snow masses. A guide for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory. París, UNESCO/IAHS Technical Papers in Hydrology Nr.1.
- van der Meer, J. J. M., Menzies, J. y Rose, J. (2003). Subglacial til: The deforming glacier bed. *Quaternary Science Reviews*, 22(15-17), 1659-1685.
- van Everdingen, R. O. (Ed.) (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. International Permafrost Association.
- Weertman, J. (1962). *Catastrophic glacier advances*. Hannover, New Hampshire, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Corps of Engineers, Report 102.
- Weertman, J. (1964). The theory of glacier sliding. *Journal of Glaciology*, 5(39), 287-303
- Whalley, W. B. y Martin, H. E. (1992). Rock glaciers: II models and mechanisms. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 16(2), 127-186.
- Zoet, L. K. e Iverson, N.R. (2020). A slip law for glaciers on deformable beds. *Science*, 368(6486), 76-78.

The Challenges, Successes, and Preliminary Status Report on the 2019 Recovery of Ice Cores from Nevado Huascarán, Earth's Highest Tropical Mountain

Los Desafíos, los Éxitos y el Informe Preliminar de la Recuperación de Núcleos de Hielo en 2019 del Nevado Huascarán, la Montaña Tropical Más Alta de la Tierra

Lonnie G. Thompson^{1,2}, Ellen Mosley-Thompson^{1,3}, Forrest Schoessow¹, Mary E. Davis¹, M. Roxana Sierra-Hernández¹, Emilie Beaudon¹ and the Huascarán Team*

¹ Byrd Polar and Climate Research Center, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA

² School of Earth Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA

³ Department of Geography, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA

Abstract

Nevado Huascarán in the central Peruvian Andes is Earth's tallest tropical mountain and lies just west of the Amazon rainforest. In 1993, scientists from the Byrd Polar and Climate Research Center (BPCRC) and their Peruvian colleagues drilled ice cores to bedrock through the col of the mountain (6050 m a.s.l.) and reconstructed a ~19 ky history of climatic and environmental variations in this region of the Andes and in the Amazon Basin. The information extracted from the 1993 Huascarán ice cores contributed to a growing body of information on pre-Holocene tropical climate and potential biological activity in the Amazon Rainforest.

In 2019 the BPCRC team returned to Huascarán and with their Peruvian colleagues drilled two cores to bedrock on the col and then drilled the first two ice cores to bedrock from the peak of the South Summit (6768 m a.s.l.). Those drilled on the summit are the highest elevation ice cores from the Southern Hemisphere. Altogether four cores were drilled on the mountain, resulting in a total 471.6 meters of ice. The very low temperatures at the bottom of the boreholes ensured that the ice was frozen to the bed and thus no time was removed from the earliest parts of the records preserved in the cores. While the drilling was underway, extensive geophysical and geodetic surveys of the col and south summit ice fields were conducted to evaluate ice thickness, ice distribution, and deformation patterns. The results of this survey will be the highest elevation ice thickness and surface topography datasets.

Here we provide an overview of the studies that are currently underway on the col and summit ice cores along with preliminary results. While the Huascarán analysis is still underway and much work remains to be done, our first assessment indicates that these new

cores have much to tell us about the tropical climatic, environmental, ecological, biological, and anthropologic history of the Andes and of the Amazon Basin over the last ~19 to 20 ky. In addition to the data obtained from the 1993 cores, we anticipate that the new cores will provide valuable data on major cation and black carbon concentrations, microorganisms (viruses and bacteria) and atmospheric gases.

In the Cordillera Blanca and throughout the Peruvian Andes, mid-tropospheric warming is destroying the climate signals preserved in the ice fields and accelerating glacier retreat. Because of its high elevation Huascarán is one of a few tropical sites where a largely unaltered climate history, which extends back to the Last Glacial Stage, is still being preserved. The 2019 field program on Huascarán can be considered to be a salvage mission to try to secure ice cores for current and future research. However, geodetic data from the 2019 field season, together with archived data, indicate that from 1987 to 2020 the total surface area of ice on Huascarán decreased by 20.5%. Given the current rate of warming throughout the tropical Andes, it is only a matter of time before climate records preserved in Huascarán ice will also be lost.

Keywords: *Ice cores, climate signal, Huascarán, col, south peak*

Resumen

El nevado Huascarán en los Andes peruanos centrales es la montaña tropical más alta de la Tierra y se encuentra justo al oeste de la selva amazónica. En 1993, científicos del Centro de Investigación Polar y Climática Byrd (BPCRC por sus siglas en inglés) y sus colegas peruanos extrajeron núcleos de hielo hasta el lecho rocoso a través del collado

de la montaña (6050 m s.n.m.) con los que reconstruyeron una historia de ~19 ka de cambios climáticos y ambientales en esta región de los Andes y de la cuenca del Amazonas. La información extraída de los núcleos de hielo del Huascarán de 1993 contribuyó a un creciente cuerpo de información del clima tropical del preholoceno y la posible actividad biológica en la selva amazónica.

En 2019, el equipo del BPCRC regresó al Huascarán y junto con colegas peruanos extrajeron dos núcleos hasta el lecho rocoso en el collado y los primeros dos núcleos de hielo hasta el lecho rocoso desde el pico de la Cumbre Sur (6768 m s.n.m.). Los núcleos de la cumbre son los núcleos de hielo de mayor elevación del hemisferio sur. En total, se extrajeron cuatro núcleos de la montaña, lo que resultó en un total de 471.6 metros lineales de hielo. Las temperaturas tan bajas en el fondo de los pozos de perforación aseguraron que el hielo se mantuviera congelado en el lecho rocoso y, por lo tanto, no se perdió tiempo de las partes más antiguas de los registros conservados en los núcleos. Mientras se realizaba la perforación, se condujeron extensos estudios geofísicos y geodésicos del collado y de los campos de hielo de la cumbre sur para evaluar el espesor del hielo, la distribución del hielo y los patrones de deformación. Los resultados de este estudio serán la base de datos de topografía de superficie y espesor de hielo de mayor elevación.

En este artículo proporcionamos una descripción general de los estudios que se están realizando actualmente con los núcleos de hielo del collado y de la cumbre, así como resultados preliminares. Si bien el análisis del Huascarán aún está en curso y aún queda mucho trabajo por hacer, nuestros primeros resultados indican que estos nuevos núcleos tienen mucho que decirnos acerca de la historia climática, ambiental, ecológica, biológica y antropológica tropical de los Andes y de la cuenca del Amazonas durante los últimos ~19 a 20 ka. Además de los resultados que se obtuvieron con los núcleos de 1993, los nuevos núcleos proporcionarán datos valiosos de los cationes más importantes y de carbono negro, de microorganismos (virus y bacterias) y gases atmosféricos.

En la Cordillera Blanca y a lo largo de los Andes peruanos, el calentamiento de la tropósfera media está destruyendo las señales climáticas que se conservan en los campos de hielo y acelerando el retroceso de los glaciares. Debido a su gran elevación, el Huascarán es uno de los pocos sitios tropicales donde aún se conserva una historia climática prácticamente intacta, que se remonta a la última etapa glacial. La expedición científica del 2019 en el Huascarán puede considerarse una misión de salvamento para tratar de asegurar núcleos de hielo para investigaciones actuales y futuras. Sin embargo, los datos geodésicos de dicha expedición, junto con datos de archivo, indican que de 1987 a 2020 la superficie total de hielo en el Huascarán disminuyó un 20.5%. Dada la tasa actual de calentamiento en los Andes tropicales, es solo cuestión de tiempo antes de que también se pierdan los registros climáticos que se conservan en el hielo del Huascarán.

Palabras clave: *Núcleos de hielo, señal climática, Huascarán, collado, cumbre sur*

Introduction

Fifty percent of Earth's surface lies between 30°N and 30°S, and it is predicted that by the mid-21st century 50% of its population will reside within the tropics (23.5°N to 23.5°S) (Harding et al., 2014). Information about past climate change in these latitudes is essential to place the current warming climate into perspective. Ice cores drilled through temperate and tropical glaciers and ice caps offer long-term histories of variability in precipitation, temperature, aridity, and atmospheric circulation that are unavailable from other proxy sources. It is of paramount importance that we attain a better understanding of the climatic factors that control the recent low-latitude glacier responses. However, the continued loss of glaciers and ice caps will increasingly compromise and eventually obliterate most of the non-polar, ice core-derived climate histories. This is a particular concern in the Peruvian Andes, where mid-tropospheric warming, enhanced by recent strong El Niño events, is destroying the climate signals preserved in the ice fields and accelerating glacier retreat (Thompson et al., 2017).

More than 99% of the world's tropical glaciers are located in the Andes (Randolph Glacier Inventory). The world's tallest tropical mountain, Nevado Huascarán (9.1°S 77.6°W; 6768 m a.s.l. at its highest point, the South Peak summit), in the Cordillera Blanca of central Peru is located ~200 km from the western edge of the Amazon Basin. In 1993, the Ohio State University's Byrd Polar and Climate Research Center (OSU-BPCRC) drilled two ice cores (160.4 m, 166.1 m) to bedrock through the ice in the col ("La Garganta") at 6050 m a.s.l. Analysis of the cores provided a paleoclimate history that extends back ~19,000 years (Figure 1) and includes the Younger Dryas and the end of the Last Glacial Stage (LGS) (Thompson et al., 1995).

In August 2019, under a cooperative research program with Peru's National Institute for Research on Glaciers and Mountain Ecosystems (INAIGEM), the OSU-BPCRC team returned to Huascarán and recovered four ice cores totaling 471.6 m. As in 1993, two cores were drilled to bedrock in the col: Col core A (CCA) is 165 m in length, and Col core B (CCB) is 168.6 m in length. However, in addition to the cores from the col, two ice cores were drilled to bedrock on the summit of the South Peak. Summit core A (SCA) and Summit core B (SCB) are 69.33 m and 68.73 m long, respectively. SCA and SCB are the highest elevation ice cores to be collected from a Southern Hemisphere glacier.

Here we describe the highlights of the 2019 field program, including the geodetic and geophysical measurements that were conducted, the analysis of the new Huascarán ice cores, and the anticipated information these ice cores are expected to provide about climatic and environmental changes in the central Andes and in the Amazon Basin since the Last Glacial Stage. These cores have the potential to provide a rare methane record from

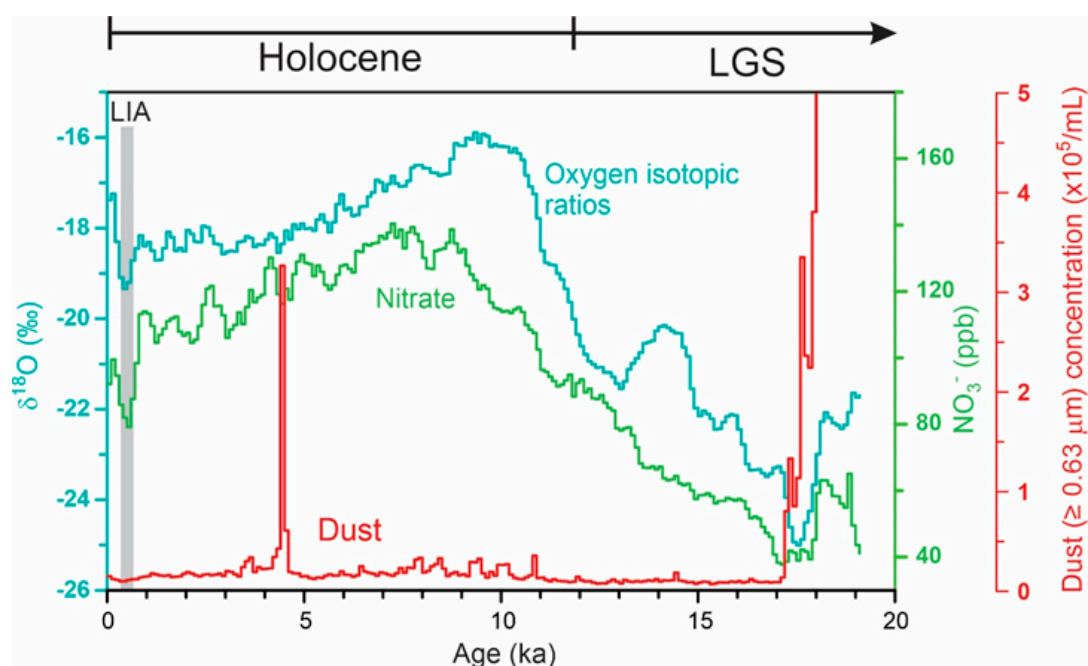


Figure 1. The ~19 kyr records (100-year averages) of oxygen isotopic ratios ($\delta^{18}\text{O}$) and the nitrate (NO_3^-) and dust concentrations from the 1993 Huascarán ice core illustrate regional and Amazon Basin climatic and environmental variations. The Holocene and the end of Late Glacial Stage (LGS) are indicated, and the Little Ice Age (LIA) is depicted by the gray shaded bar.

a tropical glacier located in close proximity to one of the world's major emitters, the Amazon Basin rainforest (Wilson et al., 2016).

The 1993 Huascarán Ice Cores as Recorders of Amazon Basin Environmental Variations

During the wet season, the easterly air masses move across the Amazon Basin and up over Andes. The Amazon Rainforest, which presently covers ~80% ($5.5 \times 10^6 \text{ km}^2$) of the Amazon Basin, is a reservoir for 10 to 15% of Earth's land biodiversity, ~15% of its freshwater, and 150 to 200 billion tons of carbon (Nobre et al., 2016). The Amazon Rainforest is one of Earth's major centers of tropical deep convection (Olson et al., 2001; Werth and Avissar, 2002), and thus environmental change in this region has major implications for the global water and carbon cycles (Werth and Avissar, 2002; Brienen et al., 2015), as well as for biodiversity (Häggi et al., 2017). Human activities during the Holocene have significantly influenced land cover (e.g., deforestation), creating major disruptions and climate changes that have altered the surface albedo and hence the net radiation budget which controls the energy available for evapotranspiration (de Oliveira et al., 2019; Stark et al., 2016). Large uncertainties are associated with the level of deforestation necessary for collapse of the Amazon Rainforest, with estimated tipping points ranging from deforestation of 20% (Lovejoy and Nobre, 2018) to 40% (Nobre et al., 2016; Salazar and Nobre, 2010) of its currently forested area.

Although there are few long-term paleoclimatic records available from the lowlands, proxy records from

the high Andes, such as those from the ice cores drilled on Huascarán in 1993, have provided important data on climate variables during the last glacial to interglacial transition (Thompson et al., 1995 and 2000). In addition to the information on regional climate since the LGS, the records from the Huascarán cores yield important insights into how the environment and ecosystems in the Amazon Rainforest have varied through time. Most prominent in the records are the 6.3‰ $\delta^{18}\text{O}$ depletion, a 200-fold increase in insoluble dust, and a two- to three-fold decrease in nitrate (NO_3^-) during the LGS compared with the Early Holocene (~10 ka BP) (Figure 1).

A climatic reversal (i.e., an episode of cooling during the deglaciation) equivalent to the Younger Dryas stadial is clearly detected in the $\delta^{18}\text{O}$ record of the Huascarán ice core, but its occurrence appears to be asynchronous with that in the Northern Hemisphere. The very low $\delta^{18}\text{O}$ values during the LGS, especially between 17 and 18 ka BP (Figure 1), have been interpreted as significant tropical cooling (Thompson et al., 1995; 2000). The amount of cooling indicated by the ice core record contradicts the 2 °C tropical temperature decrease indicated by CLIMAP reconstructions (CLIMAP, 1976; CLIMAP, 1981). However, it has become part of a growing body of evidence (e.g., Guilderson et al., 1994; Stute et al., 1995) that supports the hypothesis of much colder conditions during the LGS in the tropics (perhaps by as much as 8 °C) relative to the Early Holocene. The magnitude of the cooling has been confirmed on six continents using four decades of groundwater noble gas data along with new records from the tropics, which indicate a widespread 6 °C temperature decrease on land during the Last Glacial Maximum (Seltzer et al., 2021).

The nature and forcings of the climate and environment of the Amazon Basin during the end of the Late Pleistocene are controversial. Much of the controversy centers on the “refugia” hypothesis, i.e., the concept that during arid periods in the Pleistocene the Amazon Rainforest consisted of several small forests, which were isolated from each other by non-forest vegetation (Haffer, 1969). Gomes da Rocha and Kaefer (2019) provide a discussion of the history of the refugia controversy. The high insoluble dust and low NO_3^- concentrations in the Huascarán record during the LGS (Figure 1) imply increased atmospheric turbidity, which is consistent with climate proxy records from tropical South America that indicate lower humidity and precipitation, as well as a possible reduction of forest and grass cover (Clapperton, 1993). It has been hypothesized by Clapperton (1993) that up to 25% of South America was covered by eolian deposits, such as sand dunes and loess at this time. Although the sources of atmospheric NO_3^- are not well defined, the lower concentrations in Huascarán LGS ice imply that nitrogen sources, such as tropical rain forests and forest soils (Robertson and Tiedje, 1988) may have been restricted. Therefore, the Huascarán dust and nitrate records during the LGS appear to lend some support to the refugia hypothesis.

Throughout the most recent 10 ky of the Huascarán record, $\delta^{18}\text{O}$ steadily decreased to its lowest values in the Little Ice Age (LIA) before increasing in the 20th century (Figure 1). Nitrate concentrations follow the $\delta^{18}\text{O}$ trends, but the Early to Middle Holocene maximum lags by about 2000 years (Thompson et al., 1995). Similar to $\delta^{18}\text{O}$, Holocene NO_3^- concentrations were lowest during the LIA and have increased in the last two centuries. A higher resolution LIA record from the Quelccaya ice cap in southern Peru reveals that the first half (~1450 to 1700 CE) was cold and wet, while the latter half (~1700 to 1900 CE) was cold and dry, and the 20th century was warm and wet (Thompson et al., 2013).

The 2019 Huascarán Field Program

The organizing and preparation for the Huascarán field program started four years in advance of the actual work on the mountain. This included discussions about the project with our Peruvian colleagues at INAIGEM and development of cooperative agreements in an ever-changing political landscape. In 2016, a small team from BPCRC, including Lonnie Thompson, Emilie Beaudon, Vladimir Mikhalenko, Stanislav Kutuzov, Wilmer Sánchez-Rodríguez, and our long-time guide Félix Benjamin Vicencio Maguiña, visited Huascarán for a week and extracted a short ice core from the col. Analysis of the core showed that the seasonal oscillations in $\delta^{18}\text{O}$, NO_3^- , and mineral dust are still preserved at this site (Thompson et al., 2017). The year before the start of the fieldwork involved the planning, purchasing, and testing of scientific and drilling equipment. In January 2019 Vladimir Mikhalenko and Stanislav Kutuzov, the

chief ice core drillers, traveled from Russia to the OSU-BPCRC in Columbus to become familiar with the drill and undertake the necessary repairs and tests.

The drill, along with six tons of equipment, was shipped to Lima before the field team left the U. S. and cleared customs shortly after the team’s arrival. In Lima, Dr. María Gisella Orjeda Fernández, the former Executive President of INAIGEM, arranged media interviews and meetings with government officials, including Lucía Ruiz Ostoic, Minister of the Environment (Figure 2A), to explain the objectives of the Huascarán research.

In the province of Ancash where Huascarán is located and in Mancos where the expedition was staged, team members had a series of meetings with members of INAIGEM, with biologist Willian Martínez Finquin, the Director of Huascarán National Park, and with local media, community leaders and local residents to explain the project’s objectives and to answer questions about the project (Figure 2B). The plan was presented to employ mountaineers and porters to man-haul the drilling, surveying, and camping equipment up the mountain to the col and summit drill sites, then carry the ice cores and equipment back down to the Refugio “Don Bosco” Huascarán (a.k.a. Alpine Hut, 4650 m a.s.l.) on the flank of the mountain. The ice would be stored there in boxes along with cold packs that were frozen in two commercial freezers powered by a gasoline generator. Once the drilling was completed, the cores were to be transported to freezer trucks in the valley below and from there to freezers in Lima.

The field team, along with the equipment and supplies, moved to the Alpine Hut on July 7. There the science team acclimatized and met with then President Martín Vizcarra Cornejo to explain the objectives of the project (Figure 2C). During the president’s visit, he hiked to the edge of the ice together with the science team, guides and some local residents. After discussing the project and viewing the glacier, President Vizcarra offered to arrange for a helicopter to bring ice cores from the Alpine Hut down to the freezer trucks at the end of the project.

On July 16, Father Alessio Busanto, who manages the Alpine Hut for the Association Don Bosco, gave his blessing to the team and to the mountain (Figure 2D). Because recent avalanches made the normal climbing route to the col too dangerous, Peruvian mountaineers and porters spent several days securing a new and safer route to the col and ultimately to the South Peak summit (Figure 3). This team included guides Jorge Walter Albino Rosales, Agripino Henostroza Vargas, Guido Mollepaza Mollohuanca, and lead mountaineer Félix Benjamín Vicencio Maguiña. During the drilling season, this new and safer route was also used by many recreational mountain climbers.



Figure 2. OSU-BPCRC team members and officials from INAIGEM meet with: (A) Minister of the Environment in Lima, (B) local government officials and citizens of Mancos, and (C) President Martín Vizcarra Cornejo at the Alpine Hut on Huascarán. (D) Members of the field team with Father Alessio Busanto, manager of the Alpine Hut, who blessed the mountain and expedition members before their ascent.

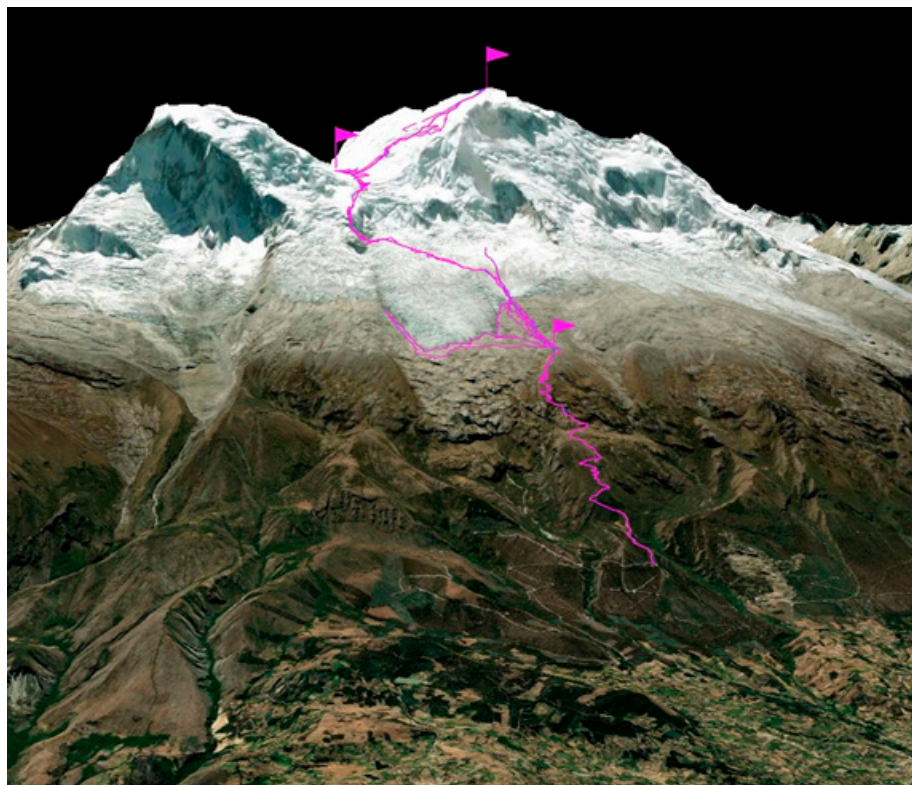


Figure 3. The route from the Alpine Hut to the Col and South Peak drill sites (marked by flags). The tandem routes, which branch from the main route, are ground penetrating radar (GPR) tracks.

Ice Core Drilling

After the new route was secured and the drilling, surveying, and camping equipment was transported up the mountain (Figure 4A), the scientists traveled from the Alpine Hut to the col. Drilling started the following day and two cores (CCA and CCB) were completed to bedrock on July 23 and July 26 (Figure 4C), respectively. Immediately afterward, the team relocated to the summit of the South Peak (Figure 4B), where drilling began on July 31 (Figure 4D). The first core to bedrock (SCA) was completed on August 2 and the second core (SCB) was completed 25 hours later. The drilling operation was conducted quickly and with very little difficulty. Borehole temperatures measured in one of the drill holes at the col ranged from $-6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 1 m depth to $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ at the ice-bedrock contact. At the summit site,

the borehole temperatures were consistently $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ from surface to the ice/bedrock interface.

An ice core processing tent was erected at the drill sites where the freshly recovered cores were logged, cut, and packed in tubes as they emerged from the drill holes (Figures 5A and 5B). Afterward they were stored in a large snow pit (Figure 5C). Eventually, porters and mountaineers under the direction of Félix Vicencio (Figure 5D) man-hauled the ice cores from the drill sites to the Alpine Hut (Figures 6A and 6B), where they were placed in insulated boxes (six cores per box), along with frozen cold packs (Figure 6C) before being flown by helicopter (Figure 6D) to the Río Santa Valley where the freezer trucks were waiting (Figure 7A). By August 17 all the ice cores had been removed from the mountain and loaded onto the trucks (Figure 7B) for immediate transport to Lima.



Figure 4. (A) Moving people and equipment up the new route from the Alpine Hut to the col. (B) Members of the field team ascending from the col to the summit drill site on the South Peak. (C) The ice core drill and the ice core processing dome stand in the center of the col on Huascarán. (D) The drill camp at the summit of Huascarán's South Peak.

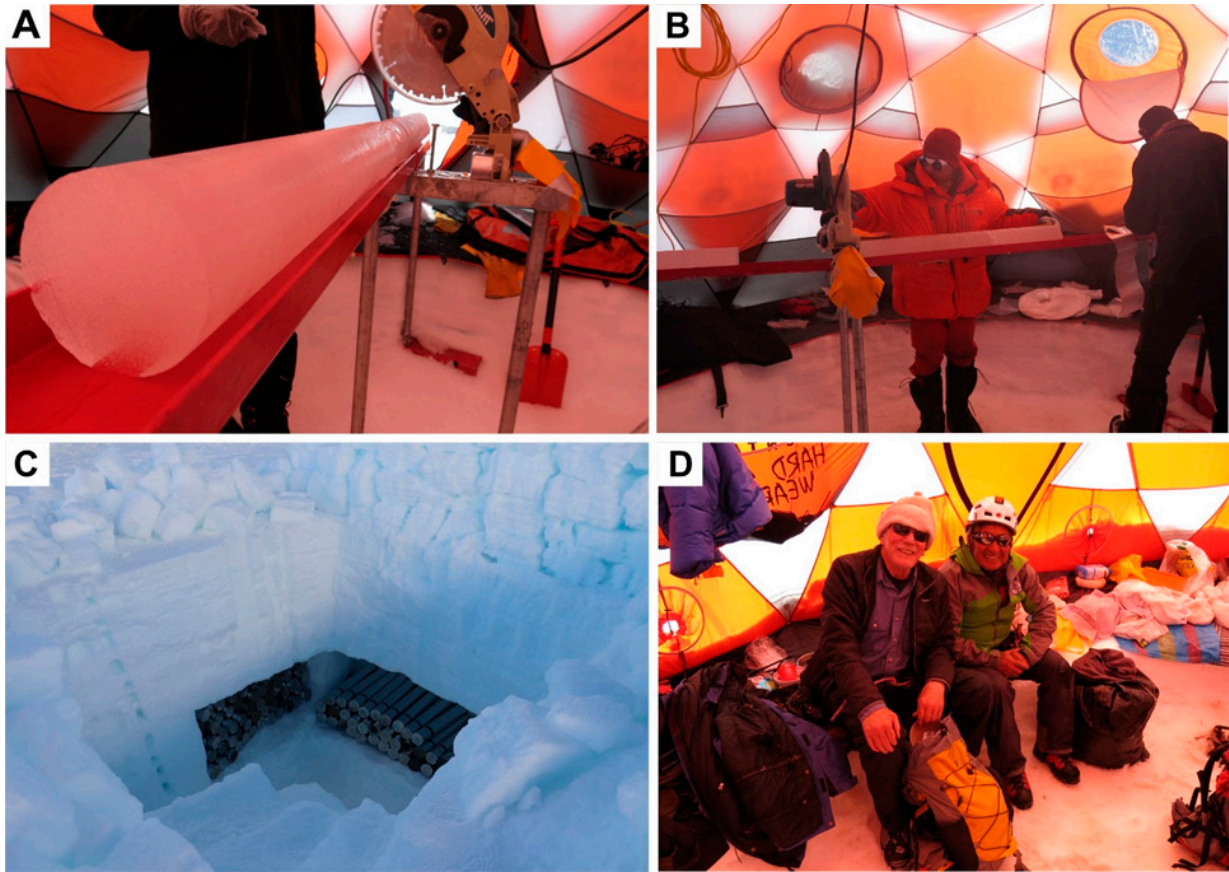


Figure 5. (A) A piece of freshly drilled ice core ready to be cut into 1-meter long sections in the ice core processing dome at the col drill site. (B) Wilmer Sánchez-Rodriguez logging a freshly cut ice core section. (C) After logging, ice cores were placed in tubes and stored in a snow pit. (D) Lead mountaineer Félix Benjamín Vicencio (right) and Lonnie Thompson inside the kitchen dome at the col.



Figure 6. (A) Porters transport the ice cores from the summit down to the Alpine Hut (B). (C) Cryopaks are frozen in two freezers at the hut and placed into the insulated core boxes to keep the cores frozen as they are transported by helicopter (D) to the valley below.

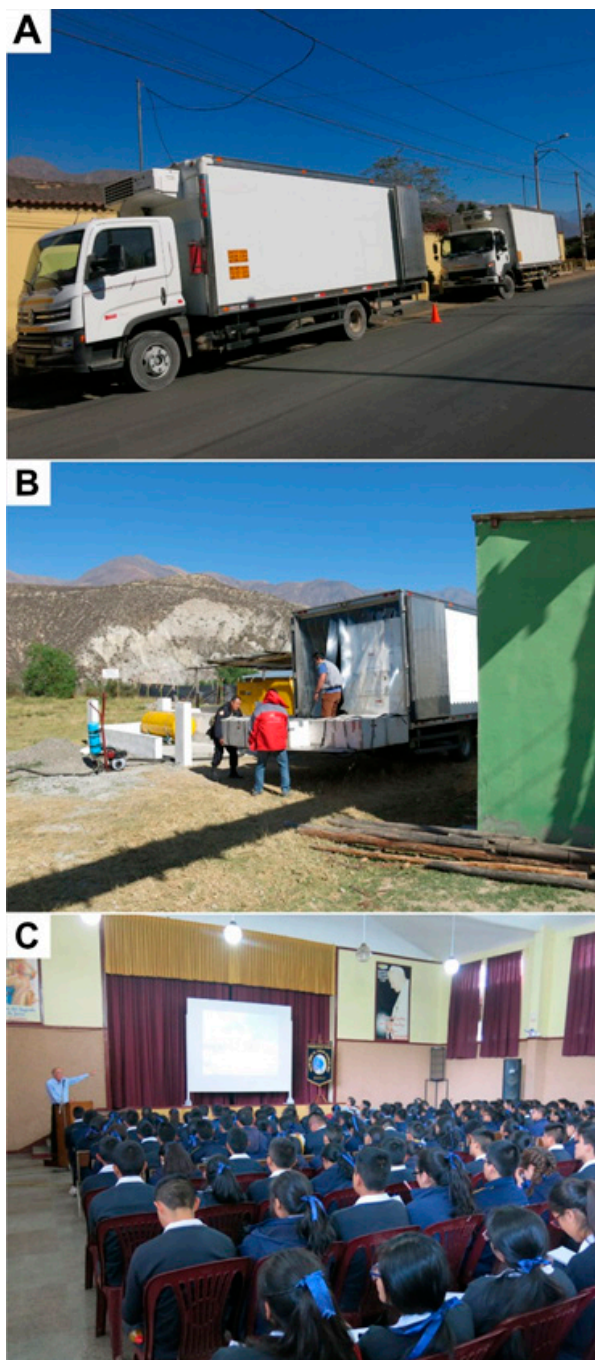


Figure 7. (A) Two freezer trucks wait in Mancos to receive the ice cores and transport them to freezers in Lima. (B) Loading ice core boxes into the freezer trucks. (C) Lonnie Thompson delivering a lecture to students of the Colegio Nuestra Señora del Sagrado Corazón de Jesús in Huaráz before departing for Lima.

Geophysical and Geodetic Field Work

While the drilling was underway, extensive geophysical and geodetic surveys of the col and south summit ice fields were conducted to evaluate ice thickness, ice distribution and deformation patterns. The results of this survey will be the highest ice thickness and surface topography datasets ever recorded in the Southern Hemisphere. In addition, the data will be used to estimate

the volume of ice on Earth's highest tropical mountain, and from this, the approximate amount of water that is stored in these ice fields can be calculated.

To accurately construct basal topography maps and measure glacier surface deformation, the surface elevation must be well constrained. A network of stakes was deployed along gridded intervals and used to perform repeated high-precision, static global navigation satellite system (GNSS) measures which were collected throughout the duration of the expedition. A total of 61.8 km of kinematic GNSS measures were made across the glacier surface, yielding 22,592 point-measures of surface elevation. One GNSS receiver was configured as a rover and used by the science team to acquire kinematic and static observations, while the other was anchored at the Alpine Hut to serve as a precision base station. The mean horizontal error of the kinematic GNSS measures was 1.8 cm and the mean vertical error was 7.3 cm. For the static GNSS measures, the mean horizontal error was 0.14 cm and mean vertical error was 2.3 cm. The ellipsoidal height measure recorded on the south summit was 6,784.16 m. It is interesting to note that personal handheld GPS devices consistently underestimated elevation across Huascarán by up to 200 meters (15 m average). Due to the high precision of the GNSS ground control points, these data have enabled us to fuse multi-sensor satellite datasets and measure the fluctuations of the surface area of the ice on Huascarán at much higher spatial resolutions. For example, from these GNSS and archived data we determined that between 1987 and 2020 the total surface area of ice on the mountain decreased by 20.5%

To measure ice thicknesses, ground penetrating radar (GPR) surveys were conducted across the col and summit along 5.8 km and 1.12 km transects, respectively, using precision GPR units manufactured by Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI) and 40 MHz (120 cm wide) antennas. The GPR receiver and transmitter were carried by the science team and one mountaineer in tandem along transect routes (Figure 3). A GNSS receiver was also carried and simultaneously recorded kinematic measures of surface elevation alongside each GPR sounding to enhance accuracy. Data were recorded as continuous profiles and the 40 MHz antennas were oriented perpendicular to the profiling direction, parallel to each other, and spaced by one standard GSSI cable length of 4 m.

This ground-controlled approach to modeling Huascarán's topography and ice hypsometry will also be useful for evaluating the quality of IceSat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2) measurements in the tropics. These data were requested in advance of the field project via NASA's Target of Opportunity Program and were acquired synchronously during the field campaign. These combined in situ and remote measurements will contribute to the empirical knowledge of tropical climate-ice interactions and further develop understanding of how ice volume, water resources, and geohazard risks are evolving in the context of a destabilizing tropical cryosphere.

The End of the Field Season

While the summit drilling was underway, a situation was developing that had the potential for serious consequences for the program and for both the Peruvian and foreign participants. A group of people from local villages expressed their opposition to the Huascarán drilling program, and as the summit drilling was being completed, the foreign members of the field team were told to evacuate from the area immediately. In response, representatives from INAIGEM, Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNAMP), and the Prefect of Ancash met with representatives of nearby villages. Nevertheless, all field team members, mountaineers and porters left the mountain prematurely. After their evacuation, the field team members held a “town hall” meeting with about 200 people in Musho, in which the local leaders presented their concerns about the activities on Huascarán. An agreement was ultimately reached which allowed our lead guide Félix Vicencio and the 38 mountaineers and porters of the field team to remove all the ice cores and equipment from the mountain by August 18.

Before leaving Huaráz, Lonnie Thompson was invited to deliver a lecture on the impact of climate change on the glaciers of Peru, along with an account of the 2019 Huascarán expedition, to 220 11th and 12th grade students and 25 faculty members at the Colegio Nuestra Señora del Sagrado Corazón de Jesús (Figure 7C). By August 22, all the field team members arrived safely in Columbus, Ohio and were followed two days later by all the ice drilled on Huascarán.

Ice Core Analysis

The analytical and interpretive phases of the Huascarán project have the following objectives: (1) establish tightly constrained timescales for each of the ice cores, (2) document and characterize abrupt climatic and environmental variations with emphasis on mid-Holocene events and the last deglaciation, (3) assess how the climate and environment have changed over the past century in response to anthropogenic forcing, (4) determine tropical atmospheric and climatological dynamics on multi-decadal, decadal, and ENSO time scales, and (5) assess the regional characteristics of climatic and environmental variability during the Holocene and Last Glacial Stage with a focus on changes in the Amazon Basin, and determine how they compare to contemporaneous conditions elsewhere. Records of stable isotopes of oxygen and hydrogen in the ice will provide histories of mid-troposphere temperature and precipitation. By analyzing biological parameters (e.g., microbial populations, pollen, and methane concentrations), we can study environmental changes in the vast Amazon rainforest, which is located in close proximity east of the glacier.

The analysis of Summit Core A (SCA) began in November 2019 and was completed in March 2020. The core was cut into 2051 samples for: (a) oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$) and hydrogen isotopes (δD); (b) mineral dust concentrations and size distributions between 0.63 and 16 μm diameter; (c) major anion concentrations (methylsulfonate, fluoride, chloride, nitrate, and sulfate);

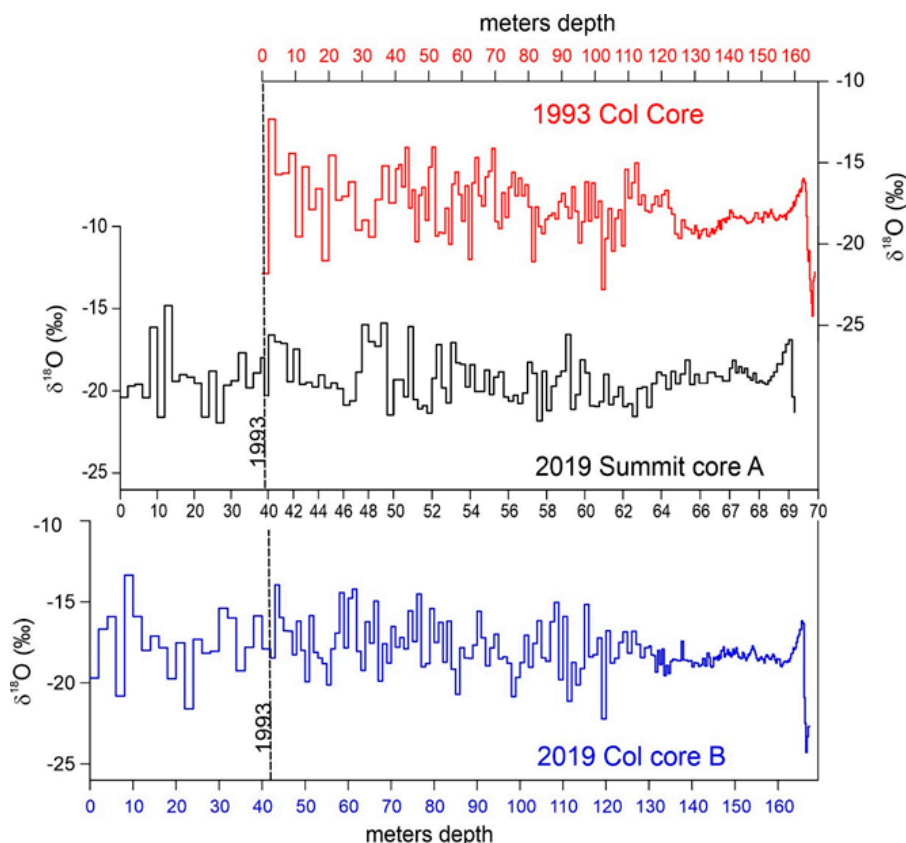


Figure 8. Comparisons between the depth averages of $\delta^{18}\text{O}$ profiles from the 1993 col core and the 2019 SCA and CCB. Dashed lines in SCA and CCB mark the year 1993.

and (d) major cation concentrations (sodium, ammonium, potassium, magnesium, and calcium). Since the $\delta^{18}\text{O}$ profile for SCA resembles that from the Huascarán col core drilled in 1993 (Thompson et al., 1995) (Figure 8), a preliminary timescale was created by matching the two profiles. Although SCA is only 41% of the length of the 1993 col core and the two col cores drilled in 2019, it appears to extend back to ~ 13.2 ka BP, or 6000 years younger than the 1993 col core. Annual layers in $\delta^{18}\text{O}$, nitrate, and dust concentrations are discernible to 55 m, which corresponds to 1920 CE. The most recent ~ 1000 years of the SCA record is contained in the top 66 meters, while 12,000 years is contained in the bottom 3 meters. This rate of increase of the time to depth ratio is similar to that observed in the 1993 col core, in which 9000 years of the $\sim 19,000$ record occur in the bottom 3 meters. The temperature measured at the base of the borehole at the summit (-9°C) indicates that no melting is occurring that would remove ice from the bottom.

Toward the end of March 2020, most operations OSU-BPCRC were shut down due to state mandates regarding the COVID-19 pandemic. After the laboratory personnel received permission from the university to return to work in mid-June 2020, the analysis of Col core B (CCB) began. Over the following year the core was cut into 5138 samples for each of the parameters listed above for SCA. Because the ice in the col is almost 100 meters thicker than on the summit, annual layer thinning occurs at a greater depth and individual years can be discerned to ~ 123 meters. As expected, the $\delta^{18}\text{O}$ profiles from the 1993 and 2019 col cores strongly resemble each other, especially the isotopic enrichment just above the sudden depletion of $\sim 8\%$ toward the bottom of the records (Figure 8).

Comparison of the 1993 and 2019 col records shows that ~ 42 meters of ice and firn accumulated over 26 years (Figure 8). Likewise, comparison of the $\delta^{18}\text{O}$ profiles from the 1993 col core and the much shorter SCA indicates that ~ 39 meters of ice and firn accumulated at the higher elevation site over 26 years.

The laboratory analyses of the bottom 19 meters of Summit core B (SCB) and the top 142 meters of Col core A (CCA) have been completed. Future plans include the completion of the CCA analyses. Along with these routine measurements of the chemical species and dust in the OSU-BPCRC labs, additional high-resolution measurements of methane (CH_4) concentrations and $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ are underway. The CH_4 analyses are being conducted by Prof. Edward Brook at Oregon State University. To date, three samples from SCA and three samples from CCB have been measured for CH_4 concentrations. The preliminary results look promising and suggest that the ice at both the summit and the col is sufficiently cold to preserve unaltered methane histories directly above the Amazon Basin. Additional methane measurements are currently underway on both the summit and col ice cores. Measurements of $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ will be conducted by Dr. Jeffrey Severinghaus at Scripps Oceanographic Institution. It is

anticipated that the data from both these gas analyses will help refine the time scales of the cores at depth.

The field team excavated a 3-meter snow pit at the col drill site and a 2-meter pit at the summit site and collected 10-cm long samples for $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, δD , dust and major ion concentrations, trace elements, and black carbon (BC) analyses. One of the objectives of the Huascarán program is to assess the seasonal variability of BC deposition at the col and summit and evaluate its potential to develop a high-resolution, long-term Amazon fire history.

Development of a Huascarán Methane Record

While the Huascarán analysis is still underway and much work remains to be done, our first assessment indicates that these new cores have much to tell us about the tropical climatic, environmental, ecological, biological, and anthropologic history of the Andes and the Amazon Basin over the last ~ 19 to 20 ka. In addition to the data obtained from the 1993 cores ($\delta^{18}\text{O}$, dust and major anion concentrations), we anticipate that the new cores will provide valuable data on major cation and black carbon concentrations, microorganisms (viruses and bacteria), pollen and atmospheric gases.

Measurements of methane concentrations are underway in both the 2019 col and summit cores. Although there are several multi-millennial records of CH_4 from polar ice cores, very few exist from glaciers in the lower-latitudes and none exist from the tropical Andes. This data gap limits our understanding of how CH_4 has varied in the tropics before and during the Anthropocene. The central Andes, including Huascarán, lie above and downwind of the Amazon Basin, one of Earth's most significant CH_4 emitters. This is of interest because most estimates indicate that tropical CH_4 sources are the largest component of the global CH_4 source budget. Although the Amazon Basin covers only 4% of Earth's surface area, it is thought to contribute 14 to 20% of the global natural emissions of CH_4 (Wilson et al., 2016). A $\sim 20,000$ -year time series of CH_4 variations from Huascarán will be integrated with similar records from Antarctica and Greenland to produce a global record of atmospheric CH_4 variability. As a bonus, such a record would provide additional time markers for the Huascarán cores because the timing of abrupt global CH_4 variations is well known from the polar ice core CH_4 records.

Conclusions

Ice cores recovered in 2019 from Nevado Huascarán are providing valuable records of climatic and environmental variations in the central Andes and the Amazon Basin extending back to the Last Glacial Stage. The records are also from the highest glacier in the tropical Andes, and for this reason their climate records have remained intact while all the others from lower elevation glaciers and ice caps in Peru have been altered by melt due to rising temperatures and its percolation

through the upper porous firn layers (Thompson et al., 2017; and 2021). Unfortunately, the 2019 field program was also a salvage mission, since the rising 0 °C isotherm in the Andes ensures that the ice on Huascarán will eventually suffer the same fate as that on lower elevation tropical glaciers. The very cold temperatures throughout the Huascarán ice are essential for the recovery of what may be the only records of methane concentrations, microbes, and organic species since the Last Glacial Stage from a tropical ice core. These data may also provide unique information on the history of environmental conditions in the Amazon Rainforest.

For the scientists, students, technicians, and mountaineers who were involved in the 1993 Huascarán project, the 2019 expedition and especially the drilling of the South Peak was a major step toward the completion of a program that was started a quarter of a century earlier. The challenge going forward that is faced by the next generation of scientists is how to use these ice core data and information from other Andean glaciological and climatological studies to help assess the future security and livelihoods of villages and towns that are located in mountain regions and exist on the front lines of climate change and its effects on mountain hazards and water resources. Also, current and future generations of scientists need to build long-term productive relationships not only with local institutions but also with local communities, and to find accessible ways to disseminate useful information with them.

Acknowledgments

Funding for the 2019 drilling project on Huascarán was provided by the National Science Foundation (NSF) Paleoclimate Program award AGS 1805819 and by The Ohio State University (OSU). The Volo Foundation provided funding for the gas analysis in the 2019 cores. We acknowledge the efforts of the OSU Byrd Polar and Climate Center's research team, Félix Benjamin Vicencio, and 38 mountaineers and porters. We acknowledge the assistance of Martín Vizcarra Cornejo, former President of Peru; Lucía Ruiz Ostoic, Minister of the Environment; Abog Víctor Saavedra Espinoza, General Manager of INAIGEM; Gisella Orjeda Fernández, former Executive President of INAIGEM; Willian Martínez Finquin, Director of Huascarán National Park; and engineers César Portocarrero Rodríguez, William Tamayo Alegre, and Gustavo Valdivia Corrales. We thank Father Alessio Busanto and all the volunteers at the Alpine Hut for their assistance. We acknowledge leaders and residents of local communities who allowed us access to the mountain at the end of the field season to retrieve the ice cores and equipment. Dr. Ping-Nan Lin and Donald Kenny (OSU-BPCRC) are performing the analyses of the Huascarán ice cores for stable isotopes, dust, and major ion chemistry. This is Byrd Polar and Climate Research Center contribution number C-1612.

Field Participants – Huascarán Team*

OSU BPCRC field team members

Lonnie G. Thompson: Field team leader, Principal Investigator
 Emilie Beaudon: Scientist, Ice core processor
 Paolo Gabrielli: Scientist, Ice core processor
 Stanislav Kutuzov: Scientist, Driller
 Ivan Lavrentiev: Scientist, Driller
 Vladimir Mikhaleiko: Scientist, Driller
 Wilmer Sánchez-Rodríguez: Ice core processor
 Forrest Schoessow: Geodetics specialist
 Roxana Sierra-Hernández: Scientist, Ice core processor

Mountaineers

Félix Benjamín Vicencio Maguiña (lead mountaineer)
 Jorge Walter Albino Rosales
 Agripino Cresencio Henostroza Vargas
 Julio Guido Mollepaza Mollohuanca
 35 porters

INAIGEM

Dr. María Gisella Orjeda Fernández: Former Executive President
 Ing. Ana Sofía Quiroz Zafra: Asesora en Gestión Pública y Modernización (Advisor in Public Management and Modernization)
 Ing. Ricardo Jesús Gómez López: Director de la Dirección de Investigación en Glaciares (Director of the Directorate of Glacier Research)
 Dr. Christian Yarleque Gálvez: Sub Director de Información y Análisis -Dirección de Información y Gestión del Conocimiento (Subdirector of Information and Analysis - Information Management and Knowledge Management)
 Ing. Óscar Vilca Gómez: Especialista en Hidrología y Glaciología (Specialist in Hydrology and Glaciology)
 Ing. Edwin Loarte Cadenas: Especialista en Hidrología y Glaciología (Specialist in Hydrology and Glaciology)
 Ing. Alexander Santiago Martel: Geomatics Specialist
 Comun. Irina Neglia Sánchez: Communications Specialist
 Comun. Joan Ramírez Romero: Publications Technician

References

- Brienen, R.J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L. . . . Zagt, R.J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519, 344–348.
- Clapperton, C. M. (1993). *Quaternary geology and geomorphology of South America*. New York, Elsevier Science.
- CLIMAP. (1976). The surface of the ice-age earth: Quantitative geologic evidence is used to reconstruct boundary conditions for the climate 18,000 years ago. *Science*, 191(4232), 1131–1137.
- CLIMAP. (1981). *Seasonal reconstructions of the Earth's surface at the Last Glacial Maximum*. Map and Chart Series MC-36. Geological Society of America.

- de Oliveira, G., Brunsell, N. A., Moraes, E. C., Shimabukuro, Y. E., dos Santos, T. V., von Randow, C., de Aguiar, R. G. and Aragao, L. E. O. C. (2019). Effects of land-cover changes on the partitioning of surface energy and water fluxes in Amazonia using high-resolution satellite imagery. *Ecohydrology*, 12(6), e2126.
- Gomes da Rocha, D. and Kaefer, I. L. (2019). What has become of the refugia hypothesis to explain biological diversity in Amazonia? *Ecology and Evolution*, 9(7), 4302-4309.
- Guilderson, T. P., Fairbanks, R. G. and Rubenstone, J. L. (1994). Tropical temperature variations since 20,000 years ago: Modulating interhemispheric climate change. *Science*, 263(5147), 663-665.
- Haffer, J. (1969). Speciation in Amazonian forest birds: Most species probably originated in forest refuges during dry climatic periods. *Science*, 165(3889), 131-137.
- Häggi, C., Chiessi, C. M., Merkel, U., Mulitza, S., Prange, M., Schulz, M. and Schefuß, E. (2017). Response of the Amazon rainforest to late Pleistocene climate variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 479, 50-59.
- Harding, S. M., McComiskie, M., Wolff, M., Trewin, D., and Hunter, S. (2014). *State of the tropics*. Cairns, Australia, James Cook University.
- Lovejoy, T. E. and Nobre, C. (2018). Amazon tipping point. *Science Advances*, 4(2), aat2340.
- Nobre, C. A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S. and Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39), 10759-10768.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P. and Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new global map of life on Earth: A new map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *Bioscience*, 51(11), 933-938.
- Robertson, G. P. and Tiedje, J. M. (1988). Deforestation alters denitrification in a lowland tropical rain forest. *Nature*, 336, 756-759.
- Salazar, L. F. and Nobre, C. A. (2010). Climate change and thresholds of biome shifts in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, 37(17), L17706.
- Seltzer, A. M., Ng, J., Aeschbach, W., Kipfer, R., Kulongoski, J. T., Severinghaus, J. P. and Stute, M. (2021). Widespread six degrees Celsius cooling on land during the Last Glacial Maximum. *Nature*, 593, 228-232.
- Stark, S. C., Breshears, D. D., Garcia, E. S., Law, D. J., Minor, D. M., Saleska, S. R., Swann, A. L. S., Villegas, J. C., Aragão, L. E. O. C., Bella, E. M., Borma, L. S., Cobb, N. S., Litvak, M. E., Magnusson, W. E., Morton, J. M. and Redmond, M. D. (2016). Toward accounting for ecoclimate teleconnections: Intra- and inter-continental consequences of altered energy balance after vegetation change. *Landscape Ecology*, 31, 181-194.
- Stute, M., Forster, M., Frischkorn, H., Serejo, A., Clark, J. F., Schlosser, P., Broecker, W. S. and Bonani, G. (1995). Cooling of tropical Brazil [5 degrees C] during the last glacial maximum. *Science*, 269(5222), 379-383.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Lin, P.-N., Henderson, K. A., Cole-Dai, J., Bolzan, J. F. and Liu, K.-B. (1995). Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science*, 269(5220), 46-50.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. and Henderson, K. A. (2000). Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science*, 15(4), 377-394.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Zagorodnov, V. S., Howat, I. M., Mikhailenko, V. N. and Lin, P.-N. (2013). Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past ~1800 years. *Science*, 340(6135), 945-950.
- Thompson, L. G., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Beaudon, E., Porter, S. E., Kutuzov, S., Lin, P.-N., Mikhailenko V. N., Mountain, K. R. (2017). Impacts of recent warming and the 2015/16 El Niño on tropical Peruvian ice fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(23), 12688-12701.
- Thompson, L. G., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Porter, S. E., Valdivia Corrales, G., Shuman, C. A. and Tucker, C. J. (2021). The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records. *Global and Planetary Change*, 203, 103538.
- Werth, D. and Avissar, R. (2002). The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), LBA 55-1 - LBA 55-8.
- Wilson, C., Gloor, M., Gatti, L. V., Miller, J. B., Monks, S. A., McNorton, J., Bloom, A. A., Basso, L. S. and Chipperfield, M. P. (2016). Contribution of regional sources to atmospheric methane over the Amazon Basin in 2010 and 2011. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(3), 400-420.

La Evolución de Humedales tras el Retroceso Glaciar en los Andes Colombianos

Evolution of Wetlands after Glacial Retreat in the Colombian Andes

Juan Carlos Benavides y Anamaría Rozo¹

¹ Departamento de Ecología y Territorio. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

La rápida transformación de los ecosistemas debido al cambio climático ha llevado a la creación de nuevas condiciones que determinan el establecimiento de comunidades vegetales y procesos como la productividad primaria neta y la emisión de gases de efecto invernadero. En los bofedales, la distribución de las especies que forman turba es controlada por factores como la química del agua, la hidrología y la elevación. Estos humedales se han desarrollado en áreas recientemente deglaciadas en los trópicos con una aparente similitud con los humedales existentes en elevaciones más bajas. Comprender el cambio de vegetación a lo largo del tiempo nos permite determinar la trayectoria de las turberas después de la retirada de los glaciares, y brinda información sobre los flujos y las reservas de carbono en el suelo. Para esto, caracterizamos la vegetación de la superficie y la vegetación histórica con macrofósiles. Se determinó el contenido de carbono extrayendo núcleos de suelo en siete turberas a lo largo de un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Natural Los Nevados en los Andes colombianos. De manera preliminar hemos encontrado que los humedales más recientes mostraron mayores reservas de carbono a profundidades intermedias y superficiales, a diferencia de los humedales más antiguos donde el carbono se concentraba en la parte más profunda y densa de la turba. También se notó el predominio de *Distichia muscoides* en la superficie y en las turberas más recientes y la dominancia de *Plantago rigida* en las turberas más profundas y alejadas del glaciar. Esto está relacionado a las fluctuaciones hidrológicas que limitan la colonización de algunas de las especies. Con esto esperamos estimar las tasas de acumulación y descomposición de la materia orgánica, y los cambios en la composición de la vegetación para predecir la dinámica de los bofedales luego del retroceso glaciar en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático, retroceso glaciar, páramo, turberas de alta elevación, *Distichia muscoides*

Abstract

The rapid transformation of ecosystems due to climate change has led to the creation of new conditions that determine the establishment of plant communities and processes such as net primary productivity and the emission of greenhouse gases. In wetlands, the distribution of peat-forming species is controlled by factors such as water chemistry, hydrology, and elevation. These wetlands have developed in recently deglaciaded areas in the tropics with an apparent similarity to existing wetlands at lower elevations. Understanding vegetation change over time allows us to determine the trajectory of peatlands after glacial retreat, and provides insights into soil carbon stocks and fluxes. For this, we characterized the surface vegetation and the historical vegetation with macrofossils. The carbon content was determined by extracting soil cores in seven peat bogs along an altitudinal gradient in Los Nevados National Natural Park in the Colombian Andes. We have preliminarily found that the most recent wetlands showed higher carbon reserves at intermediate and shallow depths, unlike the older wetlands where carbon was concentrated in the deepest and most dense part of the peat. Also noted was the predominance of *Distichia muscoides* on the surface and in the most recent peat bogs, and the dominance of *Plantago rigida* in the deepest peat bogs and away from the glacier. This is related to hydrological fluctuations that limit the colonization of some of the species. With this, we hope to estimate the rates of accumulation and decomposition of organic matter and the changes in the composition of the vegetation in order to predict the dynamics of the wetlands after glacial retreat in a context of climate change.

Keywords: Climate change, glacial retreat, paramo, high elevation peatlands, *Distichia muscoides*

Introducción

Los Andes colombianos son una formación montañosa que está dividida en tres ramales: las cordilleras Oriental, Central y Occidental, cada una con orígenes geológicos diferentes. La colisión y acreción de las placas tectónicas en el Mioceno dieron origen a esta gran formación donde, debido a la intensa actividad volcánica, se formó la Cordillera Oriental a partir de la Central. En estas grandes montañas, las condiciones topográficas han sido influenciadas por los procesos de glaciación e interglaciación en el Pleistoceno, generando un fuerte proceso de endemismo. Actualmente, tenemos seis picos glaciares por encima de los 4830 m s.n.m., cuatro de los cuales están sobre estructuras volcánicas en la Cordillera Central y los otros dos se ubican en rocas no volcánicas. En Colombia, han desaparecido ocho glaciares durante el siglo XX y se ha estimado que hemos pasado de tener 374 kilómetros cuadrados de superficies nevadas hace un siglo a tan solo 45 kilómetros cuadrados, equivalente a una pérdida del 84% de la masa glaciar del país. La acelerada pérdida de nuestros glaciares está posiblemente relacionada con el cambio climático a escala local, regional y global (Ceballos et al., 2006). Se estima que las temperaturas subirán más en las montañas altas que en las altitudes más bajas (Bradley et al., 2006), pues las montañas tropicales y los glaciares son altamente sensibles a la variabilidad climática en escalas de tiempo muy cortas.

En nuestro Laboratorio de Ecología y Cambio Climático de la Universidad Javeriana en Bogotá, realizamos visitas al Parque Nacional Natural Los Nevados (Figura 1), ubicado en la Cordillera Central,

una vez al año o cada dos años. En muchas de las visitas, acostumbramos a subir a uno de los picos glaciares llamado Volcán Nevado Santa Isabel, un volcán dormido formado por domos creados por efusión de lavas. Dentro del Parque, hay tres picos nevados, el Volcán Nevado del Ruiz, un volcán activo, el Volcán Nevado del Tolima y el Volcán Santa Isabel. El último es uno de los glaciares que más rápido se está extinguiendo, y cada vez que se sube a visitarlo, se ve un paisaje totalmente transformado. En 2014, durante una de las visitas de monitoreo del Santa Isabel por parte del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), el glaciólogo colombiano Jorge Luis Ceballos y su equipo encontraron una nueva laguna que se formó por el deshielo glaciar. Es un fenómeno que no se da con facilidad, solo si la topografía lo permite y si hay una depresión en donde se pueda acumular el agua, lo que termina formando una laguna.

En una de nuestras visitas en 2016, llegamos a ver la laguna que vio Ceballos (Figura 2). Justo detrás del nevado, vimos los colores azules y verdes de la laguna, paredes de hielo y estalactitas de hielo en cuevas creadas por el glaciar. Algo que puede ser tan positivo como negativo, es algo visualmente hermoso, pero también preocupante en términos de que nuestros glaciares están desapareciendo. Cuando un glaciar retrocede, crea nuevos espacios o ambientes que previamente no estaban disponibles para la colonización de las plantas. El retroceso también genera estructuras geomorfológicas que favorecen el desarrollo de humedales como son morrenas y erosiones de fondo de valle en regiones templadas y tropicales por igual (Cleef, 1981). Estos cambios en los paisajes alpinos tropicales tienen efectos desconocidos para ecosistemas como lagunas y turberas de páramo.



Figura 1. Parque Nacional Natural Los Nevados, vista del Volcán Nevado del Ruiz. Foto: Nicolás Skillings, quien nos acompañó a una de las salidas de campo y forma parte del Laboratorio de Cambio Climático de la Universidad Javeriana en 2017.



Figura 2. Imagen satelital del nevado Santa Isabel en el Parque Nacional Natural Los Nevados en la Cordillera Central de los Andes. Se observa cómo el retroceso glaciar ha permitido la aparición de lagunas. Foto tomada y modificada de Google Earth Pro.

Las turberas de páramo son el tipo de humedal más común e importante en las zonas alpinas, y son los que tienen un subsuelo saturado de agua donde la producción de materia orgánica excede la descomposición y hay una acumulación permanente de esta, lo que les permite poder llegar a almacenar un tercio del carbono de los suelos del mundo en solo un 3% de la superficie terrestre. Llevamos más de cinco años intentando estudiar y resolver preguntas acerca del funcionamiento de las turberas de nuestro país. El docente e investigador Juan Carlos Benavides ha sido uno de los pioneros en el estudio de las turberas en Colombia. Sus estudios de doctorado relacionaban los patrones de vegetación actual con gradientes como la altitud, la temperatura y la perturbación humana. Junto con él, hemos intentado hacer ciencia en nuestro país, en las montañas y glaciares donde se hallan las turberas.

En una salida de campo con Benavides al Parque Los Nevados, caminando en un sendero llamado mirador de Laguna Verde por la cara norte del “Santa”, vimos la presencia de turberas desde los 4000 m s.n.m. hasta los 4500 m s.n.m., unos metros más abajo de donde termina la nieve. Es un gradiente muy claro de elevación, en donde se ven turberas nuevas creadas en espacios que dejó el glaciar al retroceder, nuevos ecosistemas de humedal. El retroceso glaciar ha originado la aparición y extinción de los humedales de alta elevación a tasas aceleradas durante los últimos 200 años (Poveda y Pineda, 2009). Se puede preguntar: ¿Cuál es la temporalidad del desarrollo de turberas tras el retroceso glaciar?, y en general, ¿cómo están avanzando los humedales tras el retroceso glaciar y qué factores controlan la acumulación de carbono a largo y corto plazo? Ya que, posiblemente, la aparición de nuevos humedales tras el retroceso glaciar esté acompañada por la extinción de humedales en los límites inferiores de las zonas de páramo debido a la pérdida

de conectividad hidráulica entre las afluentes de origen glaciar y la recarga de los humedales.

Los humedales de alta elevación en Colombia son cruciales para la regulación del agua; disminuyen la intensidad de las inundaciones y mantienen las corrientes de agua. Esto hace que los humedales sean elementos importantes en los planes de adaptación al cambio climático. Las turberas pueden contener más carbono que el total almacenado en los bosques y la atmósfera. Sin embargo, cada vez se ven más amenazadas debido a la disminución del nivel freático por algunos usos del suelo que implican drenaje, como la agricultura y el pastoreo. En la actualidad, las turberas que han sido drenadas representan el 10% de las emisiones totales del sector AFOLU (agricultura, silvicultura y uso de la tierra).

Área de Estudio

En 2016, se presentó una propuesta para un proyecto ante la Universidad Javeriana a fin de poder responder estas preguntas, lo que fue aprobado y financiado. En 2017, empezamos nuestras primeras salidas de campo para el reconocimiento del área de estudio y la selección de las turberas por estudiar. Seleccionamos siete sitios distribuidos en función de un gradiente de retroceso glaciar (altitudinal), basados en la actividad glaciar, reconstruida en cada sitio utilizando el decaimiento radiactivo del isótopo de helio ^3He (Ruiz-Carrascal et al., 2013). La reconstrucción histórica de los glaciares y sus morrenas en la zona permitió asociarlos a los humedales que se desarrollaron en las concavidades producidas por la erosión generada por el derretimiento.

Luego de seleccionar nuestros sitios, empezamos con la toma de muestras. Iniciando a mitad del año 2017, salimos de Bogotá hacia la ciudad de Manizales en el departamento de Caldas, al noroccidente del país, ocho horas de carretera bajando hasta el valle del Magdalena y volviendo a ascender por la Cordillera Central. Desde Manizales hasta el lugar donde nos hospedábamos, son un poco más de tres horas de camino, en donde pasamos de 2200 m s.n.m. a casi 4000 m s.n.m., hasta llegar a una casa de unos campesinos que vivían a la entrada del Parque. Ellos siempre nos recibían con la calidez y amabilidad que caracteriza a las personas que viven en las zonas rurales de nuestro país y que nos cuentan cómo, desde que viven en ese lugar, han experimentado de cerca los cambios que han tenido los nevados y los páramos.

Desde donde nos dejó el vehículo hasta los humedales seleccionados es un poco más de tres horas de caminata. Todos los que hemos estado alguna vez en la montaña sabemos que el cansancio y la fatiga generados por la altura y las condiciones ambientales traen al final una gran recompensa. Por el sendero hacia una laguna llamada Laguna Verde, recuerdo una mañana gris, con mucho viento, con más de veinte kilos a la espalda. Un compañero cargaba una de las herramientas de trabajo llamada barrenos para perforar los humedales con todas sus partes en tan solo un hombro; era muy impresionante.

Luego de algunas horas, el páramo te recuerda y te hace sentir que estás vivo, el frío y el agotamiento se apoderan de ti, está nublado y el frío cada vez se siente más fuerte.

Finalmente, llegamos al mirador de Laguna Verde (Figura 3, izquierda), una laguna en donde los indígenas de la región realizaban rituales de pagamentos. Estaba despejado y, afortunadamente, logramos contemplarla. Los páramos son ecosistemas frágiles, pero tienen una gran capacidad de adaptación. Las plantas y los animales se adaptan para tener procesos de crecimientos lentos y así poder sobrevivir. Tal vez eso es por lo que decidimos estudiar las montañas, porque entendemos el costo evolutivo y biológico tan grande y admirable que tiene cada especie, cada planta, cada animal y cada roca que forma parte de los páramos.

Yo comencé a trabajar en las montañas cuando tenía



veinte años y ahora tengo veinticinco; empecé a trabajar como estudiante en la universidad y ahora soy profesional. Han pasado cinco años y he tenido la oportunidad, junto con mis compañeros de laboratorio, de recorrer y conocer las montañas y glaciares de Colombia, de entender por qué una turbera es importante y por qué los glaciares son importantes en nuestro país. Puedo decir que, personal y profesionalmente, he tenido cambios, así como los ecosistemas han cambiado en tan solo cinco años. Hemos tenido la oportunidad de ver la agonía del “Santa” y desearíamos no tener que despedirnos de él. Pero como Jorge Luis Ceballos dice: “Hay que homenajear al ‘Santa’. Hay que hacer una fiesta y dar gracias por lo que nos ha brindado y por las veces en que lo hemos podido admirar” [<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-santa-isabel>] (Figura 4).

Luego de observar la Laguna Verde, ascendimos



Figura 3. A la izquierda el mirador de Laguna Verde con una turbera al lado derecho de la imagen, y a la derecha la Laguna de Cristal a 4500 m s.n.m. Foto: Nicolás Skillings, 2018.



Figura 4. Encuentro de culturas en el Parque Los Nevados. Visita al Nevado Santa Isabel por parte de indígenas Arhuacos (a la izquierda) de la Sierra Nevada de Santa Marta para observar el deshielo glaciar. Foto: Jorge Luis Ceballos, 2019.

un poco más hasta una laguna glaciar llamada Laguna de Cristal (Figura 3, derecha) a 4500 m s.n.m. Allí empezamos con el muestreo en la turbera más alta de nuestro estudio. Para entender cómo han evolucionado los humedales formados recientemente, realizamos excavaciones en el punto más profundo del humedal hasta llegar a la interfaz entre la capa mineral y la zona de formación de turba, a fin de sacar el perfil de suelo y poder describir en términos de la vegetación y el contenido de carbono almacenado en el suelo.

Las turberas poseen una vegetación asociada muy específica, adaptada a condiciones de inundación, bajas temperaturas y poca disponibilidad de oxígeno. En este contexto, restos de plantas logran acumularse y preservarse por miles de años, formando archivos históricos de eventos climáticos y químicos del pasado. Las especies presentes en un humedal son determinantes en la manera como el humedal evolucionará a través del tiempo. El cambio en la vegetación asociada a los cambios en el contenido de carbono, de nitrógeno o de factores externos climáticos da una idea de la trayectoria que están tomando los nuevos humedales y los humedales más antiguos.

Metodología

Las excavaciones de los núcleos se realizaron con un perforador tipo ruso de 50 cm. El número de muestras dependía de la profundidad del humedal. Los humedales más alejados del glaciar eran más profundos que los de

mayor elevación (Figura 5). Cada muestra fue almacenada en tubos de PVC. Luego, fueron embalados y llevados al laboratorio en Bogotá para hacer la reconstrucción de la vegetación y el análisis de carbono y densidad aparente del suelo. Con el fin de conocer la fecha aproximada del inicio del humedal, datamos algunas muestras en la interfase entre la roca subyacente y los sedimentos con isótopos de carbono-14.

En el laboratorio, cada muestra se dividió en dos en forma vertical, una parte para análisis de carbono y densidad y la otra para identificación de restos microfósiles. Se analiza centímetro a centímetro cada núcleo (Figura 6). Hasta el momento, hemos analizado 1554 muestras de suelo. Para la reconstrucción de la vegetación, las muestras se ubicaron en un medio acuoso al interior de una caja de Petri, donde se separaron las diferentes especies de plantas y otros residuos que se encontraban en la muestra (Mauquoy et al., 2010). Los restos microfósiles se dividieron de la siguiente manera: restos de especies que se pudieran identificar y los sedimentos como mineral y cenizas volcánicas. Mientras se identificaban, se separaban en la caja de Petri en cada una de las clasificaciones mencionadas y por inspección visual se les asignaba un porcentaje de abundancia. Para describir la vegetación que había actualmente en la superficie del humedal, ubicábamos cuadrantes de 1 x 1 metro a lo largo de todo el humedal y, por inspección visual, asignábamos un porcentaje de abundancia a cada una de las especies observadas. El número de cuadrantes dependía del área que tenía la turbera.



Figura 5. Selección de las turberas a 4400 m s.n.m. Foto: Nicolás Skillings, 2017.



Figura 6. Núcleo extraído de una de las turberas. Se pueden observar las diferentes capas depositadas, ceniza volcánica, mineral, turba en un alto grado de descomposición y turba en menor grado de descomposición. Foto: Anamaría Rozo, 2019.

Resultados

Una de las especies más dominantes de los humedales de alta elevación de los Andes es *Distichia muscoides*. Son comunes en los Andes tropicales por encima de 4100 m s.n.m. (Benavides et al., 2013). Su crecimiento en forma de densos y rígidos cojines, junto con sus estructuras resistentes a la descomposición, las hace dominantes en turberas de altas elevaciones. Forman un paisaje con pequeñas depresiones en las que se almacena el agua (Pouliot et al., 2011). Al igual que *Distichia*, otra de las especies más dominantes es *Plantago rígida*, la cual se distribuye por encima de los 4000 m s.n.m., pero a medida que aumenta la altitud es más dominante *Distichia*.

Entre los musgos identificadas están los briofitos como *Sphagnum*, el musgo principal formador de turba en los humedales boreales (Figura 7). Su crecimiento en forma de tapetes y sus estructuras adaptadas a retener el agua la hacen una de las especies claves en el funcionamiento de las turberas boreales (Rydin y Jeglum, 2006). Debido a su alta abundancia, estas plantas son capaces de cambiar las condiciones químicas del agua, modificando el pH a niveles más ácidos (Van Breemen, 1995). En algunos de los humedales del Parque Los Nevados descubrimos la presencia de este musgo, cuya distribución solo se esperaba encontrar por debajo de los 3900 m s.n.m., que es el límite de su distribución (Benavides y Vitt, 2014) (Figura 8).

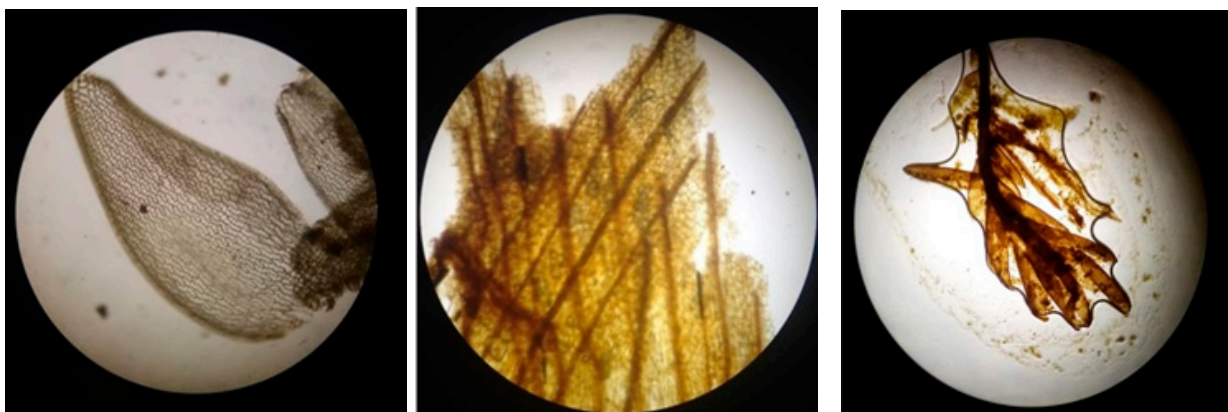


Figura 7. Fósiles de *Sphagnum* (izquierda) y *Distichia* (centro) y un musgo (derecho) al microscopio de las muestras analizadas de una de las turberas. Fotos: Anamaría Rozo usando el microscopio del Laboratorio de Cambio Climático de la Universidad Javeriana.

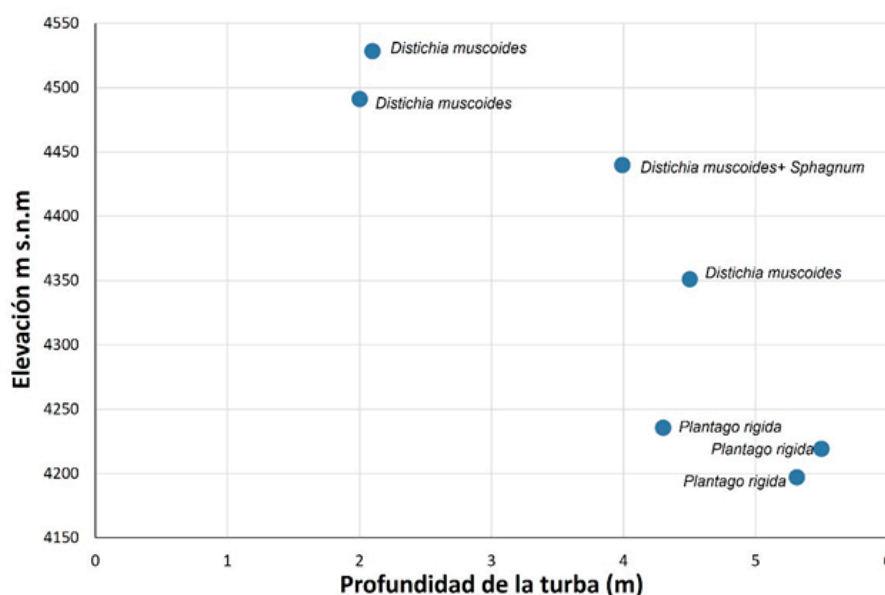


Figura 8. Gráfico entre la elevación de cada una de las turberas versus la profundidad de la turba y la vegetación dominante en cada uno de los sitios. Se observa que turberas más profundas se encuentran a elevaciones más bajas, más alejadas del glaciar, y que la vegetación dominante de cojines cambia a medida que la elevación disminuye y que musgos del género *Sphagnum* dominan junto a *Distichia muscoides* a 4400 m s.n.m.

Aparte de *Sphagnum*, otros musgos que encontramos fueron *Campylopus*, *Drepanocladus*, *Bryum*, *Calliergon* y *Straminergon*. De igual forma, también identificamos especies de *Carex* y *Calamagrostis*, con abundancias altas en la mayor parte de todo el perfil de suelo, casi desde su origen hasta en la actualidad. Dan una idea de que la formación de las turberas empieza con especies de ciperáceas y poáceas. Identificar cada una de estas especies ha sido parte de nuestra formación y en lo que hemos encontrado una pasión y un motivante para seguir estudiando las turberas. Poder identificar especies de 2 o 3 mm de longitud por medio de un estereoscopio, en más de mil muestras, puede parecer aburrido, pero ha sido poder encontrar la belleza en lo más pequeño. Es alegrarse de poder identificar un musgo que nadie había visto antes o que sólo se encuentra en un particular tipo de ambiente. El poder entender que organismos de tamaño tan reducido son capaces de almacenar y absorber tantas cantidades de carbono, es simplemente arte, arte de la naturaleza.

El profesor Juan Carlos Benavides siempre nos recuerda que es muy motivante que tantas personas poco a poco se estén interesando en las turberas y queramos resolver preguntas acerca de su funcionamiento en Colombia. Porque es un ecosistema que, a pesar de ser tan importante, es muy poco conocido dentro del gremio científico. El grupo que maneja “el Profe” tiene un poco más de veinte personas y casi a la mitad nos interesan las turberas y nos hemos dado cuenta de que es muy desafiante hacer ciencia en el país, tanto como mujer y como científica de turberas, tanto como por temas de difícil acceso a los lugares. También, como temas de orden público, por la historia de conflicto que ha tenido Colombia, es un lindo desafío personal y profesional el poder entrar a las montañas a estudiarlas. A través de la ciencia de las turberas, glaciares y montañas se da cuenta

de la realidad que atraviesa el lugar en el que uno vive. Es una realidad que no hay muchos estudiando las turberas, el carbono, los flujos de gases de efecto invernadero, la botánica de turberas, la hidrología de turberas, pero es el reto de hacer ver lo importantes que son y poder hacer algo para cambiar sus trayectorias que muchas veces no son positivas y alentadoras.

Aparte de la descripción de la vegetación, las otras variables que analizamos fueron el contenido de carbono y la densidad aparente del suelo. En nuestro laboratorio en Colombia hemos desarrollado una habilidad en casi todos los que trabajamos allí para el análisis del carbono. La mayoría de las investigaciones que realizamos están relacionadas al ciclo del carbono. Para hallar la cantidad de carbono, tomamos la otra mitad de cada núcleo y a través del método de LOI o calcinación hallamos la materia orgánica y la multiplicamos por un estándar de 0.48. Las tasas de acumulación de carbono son procesos estables que ocurren gradualmente, y que muchas veces están relacionados con las erupciones volcánicas, las cuales hacen que los humedales que han estado en formación por un corto tiempo tengan un comportamiento particular del carbono. Algunos resultados previos encontrados indican que las turberas recientes tienen altas tasas de carbono en los primeros centímetros, porque son humedales que hasta ahora se están formando y las plantas continúan colonizando y estableciéndose hasta que comienzan a producir turba. El retiro de los glaciares tiene una influencia directa en el desarrollo de las turberas y en las tasas a las que el carbono se acumula en el suelo, en los primeros centímetros de la turba o en las partes más profundas.

A futuro, queremos desarrollar modelos de la dinámica reciente de humedales mediante el uso de

patrones de acumulación que datan algunos centímetros con el isótopo de plomo ^{210}Pb . La modelación de las cronologías permitirá inferir de manera aproximada las tasas de sedimentación, productividad y descomposición a diferentes intervalos de tiempo durante los últimos 300 años. Para el modelo, usaremos la proporción entre la materia orgánica y el contenido mineral y así estimaremos las tasas de acumulación y descomposición del material vegetal. Adicionalmente, nos gustaría desarrollar un modelo que prediga la dinámica futura de los humedales de alta elevación luego del retroceso glaciar y, además, intentaremos incorporar los cambios en la composición de especies.

Para esto, se debe tener en cuenta que la aleatoriedad es una propiedad intrínseca de los procesos de dispersión y colonización de nuevos hábitats. Nosotros creemos que, dadas las condiciones de alto estrés, solo unas cuantas especies de características biológicas particulares serán capaces de colonizar los nuevos hábitats. Igualmente, la tasa de cambio climático provocará la extinción de grupos de especies con respuestas poco plásticas en las zonas más alejadas de los glaciares y en procesos de desecación.

Conclusiones

En conclusión, en nuestra investigación queremos determinar los factores que controlan las funciones ecosistémicas de los humedales de alta elevación y determinar las posibles trayectorias de estos humedales bajo los diferentes escenarios de cambio climático. Desconocemos si los nuevos humedales son capaces de reemplazar los servicios ecosistémicos que se pierden tras la desaparición de los humedales más alejados de los glaciares. La crisis ambiental que enfrentan las altas elevaciones tropicales nos ha llevado a formular una serie de preguntas relacionadas con los impactos del cambio climático reciente en los humedales de alta elevación, las limitaciones en la dispersión-colonización y supervivencia de las especies en estas nuevas condiciones, y además, tratar de entender el futuro de los humedales de alta elevación en un clima cambiante.

Todos en nuestro laboratorio hemos visto, con nuestros propios ojos, que el cambio y la transformación de estos ecosistemas son reales y están relacionados con el cambio climático. Hemos intentado poner en práctica todo lo aprendido por el profesor Benavides, y por eso queremos entender qué tanto se han visto afectadas las montañas de nuestro país, y cómo podemos seguir entendiendo su importancia para poder transmitirla.

Referencias

Benavides, J. C., Vitt, D. H. y Wieder, R. K. (2013). The influence of climate change on recent peat accumulation patterns of *Distichia muscoides* cushion bogs in the high-elevation tropical Andes of Colombia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1627–1635.

Benavides, J. C. y Vitt, D. H. (2014). Response curves and the environmental limits for peat-forming species in the northern Andes. *Plant Ecology*, 215(9), 937–952.

Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F. y Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755–1756.

Ceballos, J. L., Euscategui, C., Ramírez, J., Cañon, M., Huggel, C., Haeberli, W. y Machguth, H. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 43, 194–201.

Cleef, A. M. (1981). The vegetation of the páramos of the Colombian Cordillera Oriental. *Mededelingen van Het Botanisch Museum en Herbarium van de Rijksuniversiteit te Utrecht*, 481, 1–320.

Mauquoy, D., Hughes, P. D. M. y van Geel, B. (2010). A protocol for plant macrofossil analysis of peat deposits. *Mires and Peat*, 7(6), 1–5.

Pouliot, R., Rochefort, L. y Karofeld, E. (2011). Initiation of microtopography in revegetated cutover peatlands. *Applied Vegetation Science*, 14(2), 158–171.

Poveda, G. y Pineda, K. (2009). Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? *Advances in Geosciences*, 22, 107–116.

Ruiz-Carrascal, D., Restrepo-Moreno, S. A., y Bromley, G. (2013). *Fluctuaciones de masa glaciar del Nevado Santa Isabel, Cordillera Central (Colombia), y reconstrucción de variaciones climáticas en el Cuaternario con base en la cronosecuencia de morrenas por ^{3}He cosmogénico*. Escuela de Ingeniería de Antioquia (Colombia), Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, University of Maine (USA).

Rydin, H. y Jeglum, J. K. (2006). *The biology of peatlands*. Oxford, UK, Oxford University Press.

Van Breemen, N. B. (1995). How Sphagnum bogs down other plants. *Trends in Ecology & Evolution*, 10(7), 270–275.

Adaptive Capacity of Farming Communities to Climate Change in the Peruvian Andes: Past, Present and Future (Preliminary Findings of the ACCESS Project)

La Capacidad de Adaptación al Cambio Climático de las Comunidades Agrícolas en los Andes Peruanos: Pasado, Presente y Futuro (Conclusiones Preliminares del Proyecto ACCESS)

Nicholas Branch¹, Francisco Ferreira¹, Kevin Lane², Andrew Wade¹, Douglas Walsh³, Josie Handley⁴, Alex Herrera⁵, Harvey Rodda⁶, Mike Simmonds⁷, Frank Meddens⁴, Stuart Black¹

¹ Department of Geography and Environmental Science, University of Reading, Reading, UK

² Consejo Nacional de Investigación de Ciencia y Tecnología - Instituto de las Culturas (IDECU), Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

³ Cusichaca S.A.C, Cusco, Peru

⁴ Department of Archaeology, University of Reading, Reading, UK

⁵ Departamento de Historia del Arte, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

⁶ Hydro-GIS Ltd, Chalgrove, UK

⁷ Quaternary Scientific (QUEST), University of Reading, Reading, UK

Abstract

Climate variability has had a marked influence on water availability, traditional farming (agro-pastoral) practices, and therefore the livelihood of human communities in the Peruvian Andes since at least the Middle Horizon cultural period (AD 600-1000). Current global climate warming poses a more significant threat, however, enhancing vulnerability and creating a greater risk to all assets. To better understand the challenges faced by rural communities living with climate variability, as well as the opportunities afforded through appropriate adaptive strategies, a research pilot project (ACCESS) was conducted in the Cordillera Blanca and Cordillera Negra, Ancash region. The preliminary findings reveal that variability in precipitation over the past 1500 years was coincident with major cultural changes and advancement in water management practices, although the precise temporal relationships remain uncertain. Nevertheless, the construction of canals and reservoirs, as well as agricultural terraces, clearly indicates that past cultures in the Ancash region recognised the need to enhance resilience and for the sustainable management of natural resources. At the present day, our data indicate that local communities in both Cordilleras are experiencing the effects of climate change, especially water shortages, increasing temperatures and glacier retreat, soil degradation, and greater problems with

crop pests. These concerns are worsened by a shortage of agricultural land, conflict between communities and a lack of state intervention. Adaptive strategies proposed by communities include improved water management, economic diversification, greater community collaboration and state investment. The concerns over water availability are in agreement with the preliminary hydrological and crop-water modelling findings of the project, which indicate that with rising temperatures and variable precipitation patterns, improved water management in both cordilleras will be required to maintain effective levels of irrigation for sustainable farming and economic development. Finally, we highlight the importance of restoration of ancient water management and agricultural infrastructure, as well as the significance of indigenous knowledge amongst local communities, as a means of enhancing adaptive capacity in the face of climate change.

Palabras clave: Climate change, water management, crop water modelling, Cordillera Blanca, Cordillera Negra

Resumen

En los Andes peruanos, la variabilidad climática ha tenido una marcada influencia en la disponibilidad de agua, en las prácticas agrícolas (agropecuarias) tradicionales y, por lo tanto, en el sustento de las comunidades humanas; al menos desde el período cultural del Horizonte Medio (600-1000 d.C.). Sin embargo, el actual calentamiento global supone una nueva mayor amenaza, ya que hace aumentar la vulnerabilidad y todos los riesgos asociados al cambio climático. ACCESS fue un proyecto piloto de investigación, llevado a cabo en la Cordillera Blanca y la Cordillera Negra de la región de Ancash, con el objetivo de estudiar y comprender los desafíos a los que se enfrentan las comunidades rurales que sufren esta variabilidad climática, y las oportunidades y estrategias adecuadas de adaptación a este fenómeno. Los hallazgos preliminares del proyecto revelan que, durante los últimos 1500 años, las variaciones en las precipitaciones coincidieron con importantes cambios culturales, y avances en las prácticas de gestión del agua; aunque las relaciones temporales precisas son aun inciertas. Aun así, la construcción de canales, embalses y de andenes agrícolas, indican claramente que las culturas del pasado, en la región de Ancash, reconocieron la necesidad de mejorar su resiliencia y el manejo sostenible de los recursos naturales. Los datos resultantes del proyecto indican que, actualmente, las comunidades rurales de ambas Cordilleras están experimentando los efectos del cambio climático, especialmente en relación a la escasez de agua, el aumento de las temperaturas y el retroceso de los glaciares, la degradación del suelo agrícola, y las plagas de los cultivos. Estos problemas se ven agravados por la escasez de tierras agrícolas, los conflictos entre las comunidades, y la falta de intervención estatal. Las estrategias de adaptación propuestas por las comunidades incluyen una mejor gestión del agua, la diversificación económica, una mayor colaboración comunitaria, y más inversión estatal. La preocupación de las comunidades respecto a la disponibilidad de agua, concuerda con los datos y conclusiones preliminares de modelado hidrológico y de cultivos/agua del proyecto. Estos indican que el aumento de las temperaturas, y de los patrones variables de precipitación, harán necesaria una mejor gestión del agua en ambas cordilleras, para mantener niveles efectivos de riego y conseguir una agricultura y un desarrollo económico sostenibles. Finalmente, se destaca la importancia de la recuperación de las antiguas infraestructuras agrícolas y de gestión del agua, y del conocimiento tradicional indígena entre las comunidades locales, como medios para mejorar su capacidad de adaptación frente al cambio climático.

Palabras clave: *Cambio climático, manejo del agua, modelaje del agua de los cultivos, Cordillera Blanca, Cordillera Negra*

Introduction

The current and future impact of global climate change on the major weather systems of Peru remain to be fully understood although it is widely recognised that the dynamics of the South American Summer Monsoon (SASM) and the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) may be severely affected as well as the frequency and amplitude of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Grimm and Zilli, 2009; Vuille et al., 2012). Currently, during the wet season (austral summer – December to March) in Peru, precipitation is at its maximum due to a deep zone of convection in southern Amazonia and strong easterlies. In contrast, during the dry season (austral winter – April to November), the main zone of convection has moved north resulting in a sustained period of lower precipitation (Garreaud et al., 2009; Grimm and Zilli, 2009). Continued warming of the Northern Hemisphere and Atlantic Ocean however may weaken the SASM, which could have a significant impact on the environment, economy and society of the Peruvian Andes because of the profound influence it has on water availability and quality, traditional farming (agro-pastoral) practices, and the livelihood of local communities, amongst many other things (Bird et al., 2011). Increased variability and reduced predictability of water resources (both spatially and temporally) is therefore of considerable concern coupled with the impact of accelerated glacier retreat (in some areas) and the increased likelihood of catastrophic events (e.g., GLOF) that are hazardous to both human communities and the environment.

To better understand the challenges being faced by communities living with enhanced climate variability, as well as the opportunities afforded through appropriate adaptive strategies, we conducted a pilot project funded by the British Academy Knowledge Frontiers programme (Adaptive Capacity of Farming Communities to Climate Change in the Peruvian Andes (ACCESS)). The geographical focus of the research was the Cordillera Blanca (CB) and Cordillera Negra (CN) in the Ancash region of northern Peru (Figure 1). The present-day agro-pastoral system in Ancash has its foundations in pre-Hispanic cultural development and the transformation of the landscape through sophisticated, highly organised engineering including agricultural terraces and water management infrastructure. However, whereas in the pre-Hispanic, Spanish Colonial and early Republican past integrated socio-regional control was paramount to the sustainability of this agro-pastoral system, in the present-day, an apparent lack of investment makes local communities highly vulnerable to external forcing factors, especially climate change. For example, according to several local communities, strategies for water management employed by Peruvian institutions appear to ignore local cultural and agricultural knowledge, which reflects the long history of human occupation in Ancash. Indeed, the archaeological record suggests that the problems being faced in the CN and CB today have

parallels with the challenges experienced by communities in the past, which provides an opportunity to better understand how adaptive capacity in the present-day can potentially be enhanced by learning from ancient practices. A major challenge for local communities, policymakers, government institutes, non-governmental organisations (NGOs) and universities in the region, however, is how to unite these diverse sources of knowledge in a way that makes best use of ancient, traditional practices, local knowledge, modern approaches and scientific expertise.

Our methodology was therefore designed to: (1) evaluate ancient water management systems and cultural development in the context of past climate variability over the past 1500 years; (2) characterise the challenges and opportunities due to climate change faced by present-day communities practising agro-pastoralism; (3) provide insight into current water availability and demand, and to identify areas of future water stress. This was carried

out at representative sites in both study areas (Figure 1). Here we present a summary of the preliminary findings. We end with a comment on the important role that restoration of ancient water management and agricultural infrastructure can potentially play in climate change adaptation.

Synthesis of Past Climate Variability

Over the past 40 years, there has been a growing body of palaeoclimate data for the Peruvian Andes spanning the last 1500 years from a range of archives (e.g., ice cores, cave speleothems, lake and marine sediments, glacial landforms, peat bogs and archaeological records). Proxy records from these archives have highlighted their sensitivity to atmospheric and oceanic dynamics of tropical South American climate over various timescales (e.g., Haug et al., 2001; Chepstow-Lusty et al., 2003; Rein et al., 2005; Vuille et al., 2012; Apaéstegui et al., 2014;

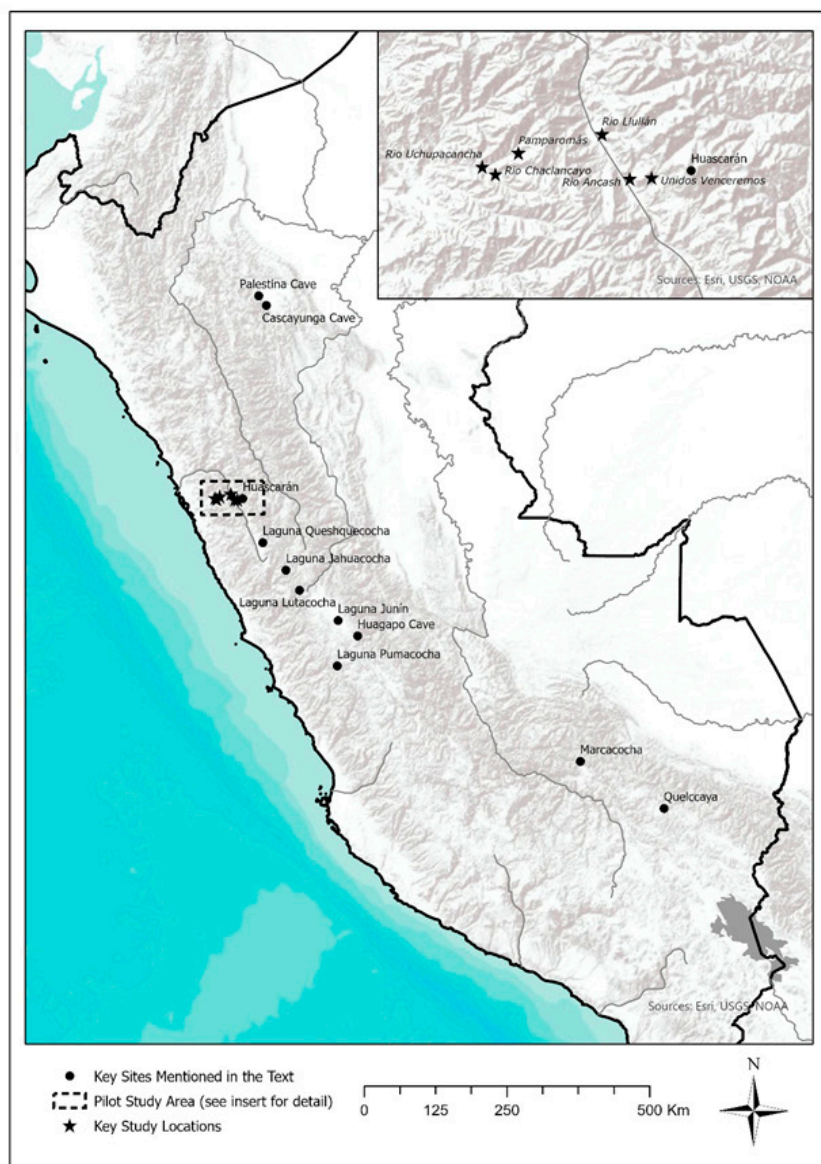


Figure 1. Location of key sites in Peru mentioned in the text. Pilot study area for the ACCESS project highlighted with insert showing the location of Unidos Venceremos, Río Lullán and Río Ancash (Cordillera Blanca), and Pamparomás, Río Chaclancayo and Río Uchupacancha (Cordillera Negra).

Stansell et al, 2017; Thompson et al., 2017; Sandweiss et al., 2020). Records have revealed important episodes of both climate change and enhanced variability such as the Medieval Climate Anomaly (MCA; AD 900-1250), Little Ice Age (LIA; AD 1400-1850) and Common Warm Period (CWP; AD 1850 to present), as well as ENSO events. These records were mainly characterised by changes in the hydrological cycle leading to variability (spatially and temporally) in precipitation due to the intensity of the SASM. Indeed, various studies have highlighted the varying influence of Northern Hemisphere temperatures, tropical Atlantic and Pacific sea surface temperatures (SSTs), the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and the position of the ITCZ on the strength or weakness of the SASM over decadal to centennial timescales. On interannual timescales, SSTs in the Pacific also appear to have had a considerable effect on moisture flow over the Andes due to the influence of ENSO resulting in either a rainfall deficit (positive ENSO - El Niño) or surplus during a negative ENSO (La Niña).

Here we provide a synthesis of some of the key changes during the last 1500 years in the Peruvian Andes, with a focus on the MCA and LIA, as the basis for discussion about the possible impact of climate variability on past water availability, its management and the socio-economic structures of human communities (see below). High-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ data from a number of caves have provided compelling evidence for Late Holocene climate change in the Peruvian Andes. At Huagapo Cave, the $\delta^{18}\text{O}$ data indicate intensification of the SASM during the Middle to Late Holocene transition

(Kanner et al., 2013), which is supported by the $\delta^{18}\text{O}$ ice core record from Huascarán (Thompson et al., 1995), and $\delta^{18}\text{O}$ lake sediment data from Laguna Junín (Seltzer, Rodbell and Burns, 2000) and Laguna Pumacocha (Bird et al., 2011) (Figure 2). During the Late Holocene, the Huagapo Cave data also suggest good agreement with the Pacific marine record indicating that variability in precipitation was consistent across a wide geographical area, and at times linked to intensification of ENSO and a weaker monsoon (Kanner et al., 2013).

From AD ~1100-1300, data from the Quelccaya ice core indicate that annual net accumulation was below average and that $\delta^{18}\text{O}$ values were variable and enriched (heavier) by comparison to average values of the last 1800 years (Thompson et al., 2013, 2017) (Figure 2). Given that the record from Quelccaya provides an indication of $\delta^{18}\text{O}$ variability during the wet season when most of the precipitation occurs in the region due to the SASM, these data indicate that the MCA was clearly a period of much lower precipitation from AD ~1100-1300. Authigenic calcite $\delta^{18}\text{O}$ values from Laguna Pumacocha (Bird et al., 2011) also suggest that the SASM was less intensive at this time, whilst $\delta^{18}\text{O}$ values from Palestina Cave (spanning the last 1600 years) similarly show enrichment from AD 920-1100, including a distinctive “double peak” at AD ~934 and AD ~1039 (Apaéstegui et al., 2014). Elevated values were also recorded at AD 421-580 and AD 722-820 at Palestina Cave, which suggests reduced SASM intensity during an otherwise sustained period of higher precipitation prior to the onset of the MCA at AD 920 (Figure 2). Apaéstegui et al. (2014)

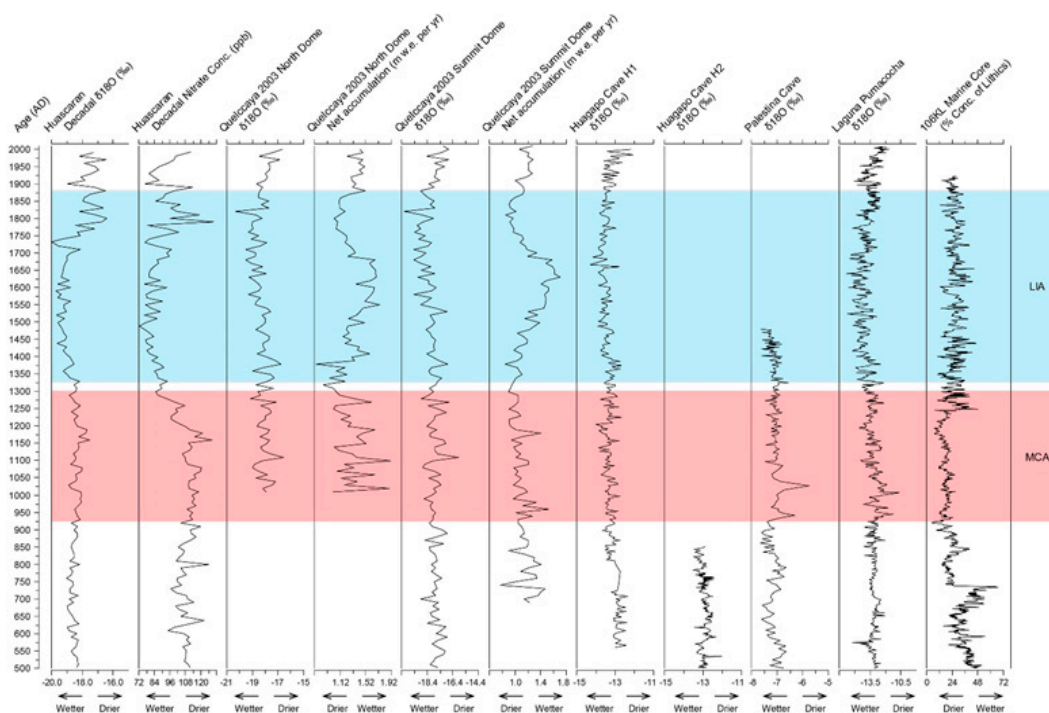


Figure 2. Selected palaeoclimate proxy data for Peru (see text for citation). Maximum age ranges for onset and termination of the Medieval Climate Anomaly (MCA, pink) and Little Ice Age (LIA, light blue) shown as shaded areas. Age model in calendar ages AD. Wetter / drier shifts shown by arrows for each record. Data downloaded from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA Department of Commerce (<https://www.noaa.gov/>).

note that the Quelccaya record similarly shows enriched $\delta^{18}\text{O}$ values at AD 990 and AD 1080, although whether these are the same events recorded at Palestina Cave and Laguna Pumacocha remains unclear, but they confirm periods of significantly less precipitation. It is suggested that reduced moisture over the Andes during the MCA may be due to higher SST in the tropical Atlantic and a more northerly position of the ITCZ over multi-decadal timescales. Interestingly, Apaéstegui et al. (2014) highlight that at Palestina Cave reduced rainfall during the wet season and correspondingly higher rainfall during the dry season may possibly explain the pattern of $\delta^{18}\text{O}$ values observed; this implies that during the main growing season for crops in the Andes, higher water availability would not have placed considerable stress on cultivation practices but may have required careful management due to reduced rainfall in the wet season. Marine sediment records off the coast of Peru similarly indicate a period of climate change during the MCA (Rein et al., 2005). These studies, based on sedimentological, alkenone and chlorin analyses, were interpreted as weakening of the ENSO signal from AD 800-1250 and a period of extreme drought preceded and followed by major flood events (Rein, Lückge and Sirocko, 2002). Finally, variation in the timing of the onset and termination of the MCA between archives and their climate change proxies has been noted by several studies, but it seems certain that the MCA was underway by AD ~900 in the Peruvian Andes.

The timing of the onset of the LIA varies considerably between archives but collectively they indicate an age range of AD ~1325-1880. This suggests a rather abrupt transition to the LIA following termination of the MCA. At Quelccaya, the onset of the LIA was evidenced by significant changes in geochemistry and a reduction (lighter) in $\delta^{18}\text{O}$ values from AD ~1520-1880 indicating higher precipitation (Thompson et al., 2013, 2017). Furthermore, the annual net accumulation significantly increased until AD ~1680 but thereafter declined (Figure 2). As noted above, precipitation in the Peruvian Andes is mainly received from the tropical Atlantic via the Amazon Basin, but it is believed that on interannual timescales SSTs in the Pacific have a considerable effect on moisture flow over the Andes influencing $\delta^{18}\text{O}$ values. This suggestion appears to be consistent between the findings from the Quelccaya, Huascarán and Sajama (Bolivia) ice core records, and collectively indicates that $\delta^{18}\text{O}$ values do also reflect SSTs in the Pacific, ENSO variability and migration of the ITCZ, despite agreement that the SASM is the primary source of moisture (Thompson et al., 1995). During the LIA, ice core geochemistry, especially higher nitrate and ammonium values, from Quelccaya also suggest higher precipitation, whilst depleted $\delta^{18}\text{O}$ values indicate lower SSTs and cooling. If these reflect Pacific SSTs and linked ENSO events, then they undoubtedly resulted in glacier mass gain, which is consistent with the higher annual net accumulation reported for Quelccaya from AD ~1520-1680 and therefore glaciological evidence for a cool and humid climate. This was succeeded by warmer and drier conditions and glacier retreat from AD ~1680-1880.

These ice core records for higher precipitation during the LIA (intensified SASM) appear to be consistent with speleothem $\delta^{18}\text{O}$ values for a 20% increase in rainfall compared to the 20th century (Reuter et al., 2009), and those from authigenic calcite $\delta^{18}\text{O}$ from lake sediments (Bird et al., 2011). At Palestina Cave, depleted $\delta^{18}\text{O}$ values were recorded at AD 1325-1820, with the lowest values from AD 1400-1593, which represents a longer time series of climate variability during the LIA than obtained from Quelccaya (Apaéstegui et al., 2014) and may also suggest complex spatial variability in LIA precipitation in the Peruvian Andes at this time (Figure 2). Similar depleted $\delta^{18}\text{O}$ values were noted at AD 580-720 and AD 820-920, which confirm higher SASM intensity at times prior to the onset of the MCA. At Huagapo Cave, a gradual decrease in $\delta^{18}\text{O}$ values was also recorded from AD 1365-1820, which is consistent with those from Palestina Cave (Kanner et al., 2013). Both Huagapo Cave and Cascayunga Cave $\delta^{18}\text{O}$ values provide clear evidence for the LIA, which is considered to reflect a period of considerably higher precipitation and variability in the tropical Atlantic (both SSTs and AMO) with higher moisture levels attributed to cooler tropical Atlantic SSTs (Reuter et al., 2009).

Data from Lagunas Queshquecocha, Jahuacocha and Lutacocha, coupled with glaciological evidence from nearby landforms, similarly noted that during the MCA glaciers retreated, resulting in lower clastic sediment input to the lakes (Stansell et al., 2013). In contrast, during the LIA glacier re-advance was evidenced by increased clastic sedimentation from AD ~1400/1500 (Stansell et al., 2017). At Laguna Pumacocha, $\delta^{18}\text{O}$ values indicated reduced precipitation from AD 900-1100 (MCA) and again from AD 1900, whilst from AD 1400-1820 there was significantly increased precipitation during the LIA (Bird et al., 2011), reflecting changes in the SASM. Interestingly, at Laguna Marcacocha, Chepstow-Lusty et al. (2003) also provided compelling evidence based on pollen records for drier episodes at AD 100 and AD 550, with an extended dry phase from AD 900-1800 during the MCA that extended into the LIA, which may further highlight regional or site-specific sensitivity to climate variability. Finally, marine sediment records from Peru indicate that between 500-700 years ago (AD ~1300-1500) lithic concentrations increased, probably related to catastrophic flood events, which interestingly coincide with the records presented above from the Andes for higher precipitation (Rein et al., 2002). These marine data suggest possible increased frequency of ENSO events from the beginning of the LIA onwards (Figure 2).

Past Climate Variability and Cultural Change

Water is a critical human resource in the present, as well as it was in the past. Throughout the pre-Hispanic period, cultural transformations were defined by how different cultures managed and harnessed water (Kosok, 1965; Lane, 2006, 2014; Ortloff, 2010). In this regard, our study area stretches across two cordilleras from the

Cordillera Blanca's (CB) Huandoy glacier (6356 m a.s.l.) to the foothills of this mountain range, encompassing the Ancash, Llanganuco and Lullán river basins (Figure 1). These high energy streams flow into the section of the Santa River sandwiched between the Cordillera Negra to the west and Cordillera Blanca to the east, a major inter-Andean valley, also known as the Huaylas callejón or corridor. Further east rises the glacier-denuded Cordillera Negra (CN), from the high peak of Cerro Rico (5004 m a.s.l.) down the Chaclancayo (also known as Huarac Pampa) and Uchupacancha river basins, down to the coast and the Pacific Ocean (Figure 1).

The CB and the CN are a study in contrasts. While glaciers have been a permanent feature of the CB since at least the Pleistocene, the CN has been mostly stripped of permanent ice cover for most of this same period (Mark and McKenzie, 2007; Stansell et al., 2017). Indeed, aside from the Cordillera la Viuda in central Peru (Olarte Navarro, 2007), the whole of this Pacific-facing mountain range nowadays relies exclusively on seasonal rainfall and winter sea-fog (*garúa*) for hydrological replenishment. Given the fact that most of this precipitation comes from the Amazon Basin through strong easterlies pushing into the Andes during austral summer rains (December to March) (Garreaud et al., 2009), it is of little surprise that annual precipitation tends to be considerably lower in the CN (c. 500 mm) than in the CB (c. 1000 mm) (Tremolada et al., 2008). Therefore, not only does the CN not benefit from glacier runoff, but it is also considerably drier than the other mountain ranges in the region. This has shaped past human responses to water across both cordilleras, responses with important repercussions for today's increasing water insecurity across the region.

Extensive archaeological survey and excavation by our team (1999-2021) have revealed evidence of continuous settled occupation of the area since the late Formative Period or terminal Early Horizon, c. 200 BC, and previous excavations in the area attest to the presence of hunters and early farmers as far back as 10,000 years ago (Lynch, 1971). Beginning with settlement on the deep rich soils on the valley floor, the farming landscape gradually filled in with settlements at water sources and along routes across the glaciated mountains. Overall, a number of important shifts in settlement patterns are apparent in the area, occurring during the late Middle Horizon (AD 800-1000), the Late Intermediate Period and Late Horizon (AD 1000-1400 and AD 1400-1532 respectively) and the early Spanish Colonial Period (AD 1532-1615). Settlement shifts which have important connotation in regards to water management systems.

Therefore, while hydraulic technology is common to both cordilleras, the level of investment in the drier CN was of considerably more magnitude given the greater water exigencies prevalent in this mountain range. That said, irrigation canals are ubiquitous to the Andes, in use since at least the Fifth Millennium BC (Dillehay, Rossen and Netherley, 1997), serving to transport water

from source to where it is required in the most efficient manner possible (Denevan, 2001: 146). In our study area, most canals tend to be local affairs moving water short distances from glacier outflow, rivers, and basins to nearby fields and pastures. Larger canals, such as the Huiru Catac in the Jimbe Valley were probably late pre-Hispanic or Inca (AD 1400-1532) mega-projects aimed at supplying water to the coast (Maza, 2017). In many cases in the pre-Hispanic past, canals were associated with terraces (Denevan, 2001: 141), although in the study area most terraces have long been abandoned or destroyed to allow animal (mainly oxen and mules) traction ploughing of larger fields. In the vertiginous slopes of the study area, this has led to considerable soil erosion.

Across the research area ancient gravity irrigation canals, many of which are still in use, denote significant coordinated investment of labour for agriculture. Large acequias madres (primary canals) criss-cross both the CB and CN, some of them as rock cut canals similar to those found at Cumbemayo, Cajamarca, suggesting Early Horizon (1200-100 BC) use of this type of technology in the area. Likewise, in the higher areas of the CB, several canals transport water from glacial basins to their drier neighbours. In turn, this water is also used to replenish wetland areas – such as Huarca (near Yungay) – all indicative of a sophisticated hydraulic technology employed in both agriculture and herding. Evidence of repair, erosion, and changes in the form of the canal at the Middle Horizon (AD 600-1000) site of Keushu, for instance, suggests intensified water resource use during this period (Herrera, 2017: 216), but due to uncertainty over the precise timing of construction of these canals it remains unclear whether this was a response to enhanced water availability prior to the MCA, or reduced water during the MCA.

Indeed, the Middle Horizon (AD 600-1000) was crucial for the development and expansion of water capture technology across the Andean highlands, although it remains uncertain whether this expanded after the start of the long dry period (AD ~900; see above, also, Orloff, 2010: 57-59) associated with the onset of the MCA. In our study area, we hypothesise that the CN led the way in hydraulic technology expansion throughout this end phase of the Middle Horizon and the subsequent Late Intermediate Period (AD 1000-1400), attempting through various engineering constructions to assuage incipient and incremental water insecurity. Greater precipitation, and generally colder conditions, in the period after AD 1325 with the onset of the LIA does not coincide with an appreciable increase in hydraulic technology use either in the CB or CN. Nevertheless, this subsequent period of the LIP until the Inca conquest during the early 15th century was marked by heightened levels of internecine violence and the construction of easily defensible hilltop settlement sites across the highlands (Arkush and Tung, 2013). Ethnohistoric and palaeoenvironmental evidence, though, does posit an important change in baseline economics with increasing investment in camelid herding over farming in the highlands, which continued under the Inca (AD 1400-1532) (Chepstow-Lusty, 2011; Duviols, 1973).

Overall, the expansion in water technology throughout this whole period was also conducted against the backdrop of an ever-increasing human population, which reached its apogee shortly before the arrival of the Spanish in AD 1532 (Cook, 1981). Technological expansion and innovation came in the form of water dams, reservoirs, artificially irrigated wetlands using check-dam type silt-traps known as silt dams and reservoirs, terraces, canals, and other associated hydraulic infrastructure, sustaining a technologically savvy, highly specialized and integrated agro-pastoralist economy. The ensuing hydraulic landscape transformation enabled the storage of water both physically and geologically on a whole-of-basin or -tributary basis (Lane, 2017). There was also investment in hydraulic engineering in the CB, even if this entailed less large upland dams, given the prevalence of natural lakes and glacier meltwater, and more reservoirs and canals ensuring water availability to farming and herding areas.

Importantly, during the LIP all this infrastructure was managed at a community and village level (respectively the *ayllu* and *llacta/marca*) by corporate groups rather than well-established hereditary elites (Lane, 2009). Later incorporation of all this region into the Inca Empire (c. AD 1450) brought with it modifications to the hydraulic system while maintaining much of the underlying socio-economic lifeways, beyond perhaps a certain shift towards greater societal hierarchy, including the emergence of potentially hereditary *curaca* or chiefs (Aibar Ozejo, 1968). At this stage in the late pre-Hispanic period (and throughout much of the 16th century) this region, the Inca province of Huaylas, was one of the richest and most populous of the Andes (Levillier, 1926: XIII: Segunda Parte: 308-9). A prosperity based essentially on a persistence of small-holder subsistence agriculture that continues altered but unabated, at least in the CN, up to the present (Rasmussen, 2015). The CB is different given that continued recourse to water, and indeed increased water availability due to glacier retreat and enhanced meltwater flow, has led to evermore market-orientated initiatives, such as export quality flower-growing, with the potential environmental and social problems that this brings in its wake (Orlove, 2020).

Spanish conquest impacted heavily on the Andes and in the Huaylas region, through the triple ills of disease, dislocation and depopulation. Severe depopulation through deadly European diseases and community dislocation caused upwards of a 60% reduction in population during the first 100 years of contact (Cook, 1998) and the whole region entered into a downward spiral from which it only slowly emerged during the 20th century. In this context, the rich suite of hydraulic engineering that had met local needs during the pre-Hispanic period was abandoned wholesale such that it was mainly only canals which were up-kept. Indeed, it is relatively recently that a buoyant human population coupled with the exigencies of modern life and climate change are gravely stressing local resilience and water security. Yet, modern populations and governments seem ill-equipped to mitigate against

ever-increasing water stress even when the area is replete with potentially re-usable pre-Hispanic installed hydraulic capacity in the shape of water dams, reservoirs and relict terraces. Only new thinking that incorporates modern solutions, such as drip irrigation, and rehabilitates old technologies has a chance of meeting people's needs in the short-term, while guaranteeing water security in the medium- and long-term.

Climate Change: Challenges and Opportunities for Farming Communities

Andean mountain ecosystems are much affected by climate change (Torres, Frías and de la Torre, 2014; Schoolmeester et al., 2016; Duputis, 2021), especially in relation to water availability and agriculture, which is the main economic activity of local indigenous communities, so they are very vulnerable to this phenomenon (USAID, 2011; Pramova, di Gregorio and Locatelli, 2015). This is the case of the Cordillera Blanca (CB) and Cordillera Negra (CN), where abundant studies on the impact of climate change have been conducted (Carey, French and O'Brien, 2012; McKinney, Anderson and Byers, 2011). The research of the ACCESS project in these cordilleras included an important social science dimension, designed to integrate the socio-economic context with local knowledge and cultural characteristics of rural farming communities, by exploring the ideas and perceptions of members of the communities about their agricultural systems and problems of living with climate change. This is important because local and indigenous knowledge and traditions are key to climate change adaptation, in the Andes and beyond (Valdivia et al., 2010; Kirkland, 2012; Walshe and Argumedo, 2016). The pilot research was mainly based on ethnographic fieldwork conducted by the project members (summer 2019), involving participatory workshops and interviews following a methodology known as RAAS (Barrett et al., 2017; Schut et al., 2015) (Figures 3A and 3B). In the CB, fieldwork focused mainly on the peasant community of Unidos Venceremos (near Yungay), while in the CN we focused on the peasant community of Pamparomás (see <https://arcg.is/0rLeXm> [English version]; <https://arcg.is/19yWum> [Spanish version]) (Figure 1).

Our preliminary findings indicate that both cordilleras are dominated by the presence of what is known as peasant communities, formerly called indigenous communities, which have a special legal status based on distinctive communal features (e.g., ownership of their territories) (Ferreira, 2012). In these communities, all local families own land and work in agriculture, which tends to be their main economic activity, complemented with other sources of income (e.g., working in shops, taxi services and temporary migration). Agricultural production in these communities is partially used for self-consumption (traditional crops such as maize and potatoes in both study areas), and partially oriented to the market economy (e.g., flowers and greenhouse fruit in the CB) due to their proximity to coastal and urban areas. In contrast, the main river valley (Río Santa) that separates



Figure 3. A selection of photographs taken during the field investigations. A. Workshop at Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (Huaraz). B. Workshop at Pamparomás village (CN) with the Junta de Desarrollo Distrital de Pamparomás. C. Canalised edge of the Huarca wetland (CB) supplying irrigation water. D. Modern reservoir in the Río Uchupacancha (CN). E. Flow gauging in the Río Uchupacancha (CN). F. Pre-Hispanic water dam of Ricococha Alta (CN).

both cordilleras (Callejón de Huaylas) is dominated by the presence of cities, towns and semi-rural areas, where land tenure and agro-pastoral work are based on full private property. Many people living there, including those in urban centres, tend to own or have access to some rural land, and to work to some degree in agriculture, as a complementary economic activity. Other important economic activities in the area are tourism (attractive because of the snow-capped mountains and glaciers) and mining, which has an important environmental cost. As a result, the Ancash region is comparatively wealthier than others in the Peruvian Andes (latest figures from Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú (www.inei.gob.pe/): national poverty rate 20.5% in 2018; Ancash 22.0% compared to Cusco 25.0% and Ayacucho 51.5%). In the CB peasant communities are comparatively better off, as water is more abundant because of the presence of glaciers and due to glacier retreat (Raymondi, Delgado-Arias and

Elder, 2012). Therefore, agriculture is more productive and more profitable, allowing greater investments in infrastructure (e.g., greenhouses, technified irrigation). There are also more economic opportunities related to tourism and other activities. In the CN, communities are comparatively poorer because water is scarcer and agriculture less productive, and there is less diversity in local economies, so less profits and investment.

Within each study area, our research has identified the following main socio-economic and environmental challenges, which are deeply interrelated (Tables 1 and 2). **Lack of water for agricultural use:** Most sources highlighted this as the most important challenge for local peasant communities. This has been a long-term problem in this and in other Andean areas, although it has worsened in recent decades due to decreasing precipitation and more irregular weather conditions,

including an increasing number of extreme events (e.g., prolonged and harsh frosts). **Increasing temperatures and glacial retreat:** Most sources also agreed that the acute increase in temperature in recent years is one of the main challenges for local agriculture. This has contributed to increasing aridity and impoverishment of agricultural soils, which are less productive and need more irrigation as a result. It has also contributed to gradual changes in local production areas and ecological zones, marked mainly by altitude, which have had a direct effect on local agriculture, with an upwards movement of ecosystems, crops and also an increase in crop pests (as reported in other Andean areas e.g., Skarbø and Lambrou, 2015).

Soil degradation, pests and agrochemicals: The increasing degradation of agricultural soils and crop pests in the agricultural areas has contributed to the increased use of agrochemicals (fertilisers, insecticides and herbicides). The long-term impact on soil health is currently unknown. **Lack of agricultural land for local families:** Successive plot subdivisions through inheritance reduces families' access to agricultural land. As a result, families and individuals, mostly youngsters, who have not enough land and have to look for complementary economic activities (e.g., commerce, daily waged labour) or are forced to migrate. The latter contributes to the higher age range of the remaining population and, sometimes, to workforce shortages for agricultural work. **Conflicts within and between local communities, and weakening of social bonds and cohesion:** The lack or insufficiency of natural resources (e.g. land, water), and the resulting competition for them, has been a source of internal and external conflicts and competition within and between local communities, which has been increasing in recent years. This takes place between local families and sectors, between neighbouring communities, and between communities and other actors (e.g., mining companies). Most of these conflicts involve water, land or environmental problems (e.g., contamination, pollution). Older farmers also pointed to the weakening of social bonds and cohesion within communities as an emerging problem, as a result of an increasing materialism and individualism among the young, and of an increasing disrespect towards older generations.

Lack of state intervention: Most farmers also pointed to the role of the state as an important factor in local agriculture, mostly in negative terms. At a general level, many criticised the negligence of the state towards Andean areas and rural communities, and its lack of interest and support for small-scale agriculture. Specifically, they criticised state intervention in their communities as insufficient, inefficient and affected by problems such as widespread corruption, discoordination between different levels (national, regional, local) and political interests. They were demanding more and better support by the state.

Within each study area, our preliminary research has identified the following main socio-economic and environmental opportunities and possible solutions

Table 1. Ranking of main agricultural challenges and opportunities identified by local farmers in the fieldwork's workshops according to their importance: Cordillera Negra (workshop conducted in Pamparomás on September 6, 2019).

A. Challenges-problems	B. Solutions-opportunities
	b.1. Very important
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Improvements in collaboration and unity (social cohesion) in local communities 2. Improvement of state intervention and coordination 3. Dam ponds and lakes in high areas 4. Reforestation 5. New technologies for storing water (e.g., filtration ditches) 6. Construction of reservoirs for rainwater harvesting 7. Improvement of local communication and access (roads, paths, etc.)
a.1. Very important	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Lack of water for agriculture 2. Irregularity of rains 3. Increasing temperatures 4. Droughts 5. Lack of state support 6. Mining-related contamination 7. Increasing plagues and pests 	
	a.2. Important
<ol style="list-style-type: none"> 1. Degradation of soils in agricultural lands 2. Loss of social unity (cohesion) within local communities 3. Lack of coordination between agriculture and herding 4. Lack of combination of ancient and traditional technologies with modern ones and science 5. Use and abuse of agrochemicals 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Improvement in general planification (agriculture, etc.) 2. Technified irrigation combined with traditional technologies 3. Improvement of agropastoral training and formation 4. Increase economic diversification (to avoid migration, etc.) 5. Better organisation and management of river basins 6. Limit and reorganise herding in high areas
	a.3. Less important
<ol style="list-style-type: none"> 1. Lack of efficient agropastoral training 2. Migration of local youngsters 3. Need to introduce improved livestock breeds 4. Frosts 	b.3. Less important
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tourism 2. Installation of greenhouses (in lower areas) 3. Set up associations of agricultural producers

Table 2. Ranking of main agricultural challenges and opportunities identified by local farmers in the fieldwork's workshops according to their importance: Cordillera Blanca (workshop conducted in Huaraz on September 9, 2019).

A. Challenges-problems	B. Solutions-opportunities
	b.1. Very important
a.1. Very important	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Increasing temperatures 2. Glacier retreat 3. Lack of water for agriculture 4. Irregularity of rains 5. Degradation of soils in agricultural lands 6. Use and abuse of agrochemicals 7. Lack of support by the state 8. Increasing plagues and pests 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Construction of reservoirs for rainwater harvesting 2. New technologies for storing water (e.g., filtration ditches) 3. Technified irrigation combined with traditional technologies 4. Improvement of state intervention and coordination 5. Improvement of education 6. Tourism 7. Reforestation 8. Better organisation and management of river basins
a.2. Important	a.2. Important
<ol style="list-style-type: none"> 1. Droughts (increasing and worsening) 2. Lack of combination of ancient and traditional technologies with modern methods and science 3. Mining-related contamination 4. Lack of efficient agropastoral training 5. Frosts (increasing and worsening) 6. Loss of social unity (cohesion) within local communities 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Improvement of local communication and access (roads, paths, etc.) 2. Improvement of agropastoral training and information 3. Improvement in general planification (agriculture, etc.) 4. Increase economic diversification (to avoid migration, etc.) 5. Improvements in collaboration and unity (social cohesion) in local communities
	b.3. Less important
a.3. Less important	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Need to introduce improved livestock breeds 2. Agroindustry 3. Migration of youngsters 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dam ponds/lakes in high areas (when they are not in protected spaces) 2. Limit and reorganise herding in high areas 3. Set up associations of agricultural producers 4. Installation of greenhouses (in lower areas)

(Tables 1 and 2). **Water supply for agricultural use:** Most local sources pointed to technified irrigation (through aspersion stationary processes [for flowers in the CB] or drip irrigation [for fruit in the CB]) as the main solution to the lack of water. However, they recognise that this requires a high level of investment and many families acknowledged that they cannot afford the apparatus, while the state is not investing in such infrastructure. An alternative suggestion was the construction and improvement of infrastructure, such as dams in higher elevation lakes and reservoirs for rain harvesting in strategic locations, although such measures also involve high investment. Some sources highlighted the need to combine modern technology and science with the use of ancient Andean technology and techniques of water supply and management for agricultural use, such as contention ditches, wetlands (*bofedales*) and agricultural terraces. Others highlighted the need to improve the management of river basins and micro-basins in the area as an important source of water for agricultural use.

State intervention: Most informants pointed to greater involvement and commitment of the state within Andean areas and agriculture, and of an increase and improvement of state intervention in local communities as a channel to improve their agriculture and address some of its challenges. Particularly, they pointed to the need for more state investment in agricultural infrastructure (e.g., technified irrigation, reservoirs) and training (e.g., agricultural techniques, crops), and the need to increase and improve the coordination and collaboration between state levels (local, regional, national) and programmes in relation to agriculture and environmental conservation. More specifically, they demanded more and better specific training by the state and NGOs about climate change and its repercussions, especially in relation to the future challenges and opportunities for their communities. **Economic diversification:** One of the alternatives that some sources suggested to tackle agricultural challenges in local communities was to diversify their economic activities, for example enhancing internal commerce, business and tourism. They argued that this would be a way of counteracting their excessive dependence on agriculture, and of creating new opportunities for local people, thus reducing out-migration. **Improve collaboration and unity within and between local communities:** As commented above, one of the problems that some sources singled out in local communities was the increasing loosening and erosion of social unity and cohesion between their members, and regarding the communal system of peasant communities. Some even considered this as a major threat for the future survival of their communities, and pointed to the need for improving the internal collaboration and unity among members as a way of bettering their socio-economic situation and social cohesion. For agropastoral farming systems, this improvement in internal collaboration would include better coordination between herding and agriculture, and between community sectors for irrigation and the distribution of resources.

Water Availability and Climate Change: Implications for Farming Communities

Water availability from precipitation and irrigation was compared to the crop water requirement in four catchments in the Ancash region to determine whether there was a water surplus or deficit for farming (Figure 1). As such, this hydrological aspect of the overall study aimed to compliment larger scale assessments of water availability and demand in the whole Río Santa catchment (e.g., Aste Cannock, 2018). This is through a nuanced consideration of the impact of present-day and future water availability on the communities living on the mountain slopes above the larger urban centres and more intensive farms of the Río Santa valley floor.

Of the four study catchments, the Río Lullán and Río Ancash are in the Cordillera Blanca (CB) and the Río Uchupacancha and Río Huarac Pampa (Chaclancayo) are in the Cordillera Negra (CN) (see <https://arcg.is/0rLeXm> [English version]; <https://arcg.is/19yWum> [Spanish version]) (Figures 4 and 5). All four catchments are relatively small (< 150 km²) and at elevations above 1400 m

a.s.l. In the Río Ancash and Río Lullán, multiple crops are grown all year using the wet season precipitation, which is some 97% of the total, and using inundation and some sprinkler irrigation in the dry season. Air temperature is strongly dependent on altitude, yet relatively constant through the year, which means that the glaciers melt all year producing irrigation water. Melt water, collected in Laguna Llanganuco in the Río Ancash and Laguna Parón in the Río Lullán, supplies the irrigation networks. In the CB, field inundation irrigation takes advantage of gravity and water is fed into ever smaller canals, which are eventually hand-dug to irrigate individual fields. There is some use of groundwater springs, seeps and wetlands but this is very localised (Figure 3C). A large, and as yet unquantified, proportion of the irrigation water flows beyond the lower reaches of the Ancash and Lullán catchments to irrigate farmland adjacent to the Río Santa.

No glaciers exist in the CN study area and water for irrigation is abstracted from streams and wetlands (*bofedales*). The water is stored in reservoirs behind dams in various states of repair at higher elevations and large tanks or reservoirs in the lower valley reaches (Figure

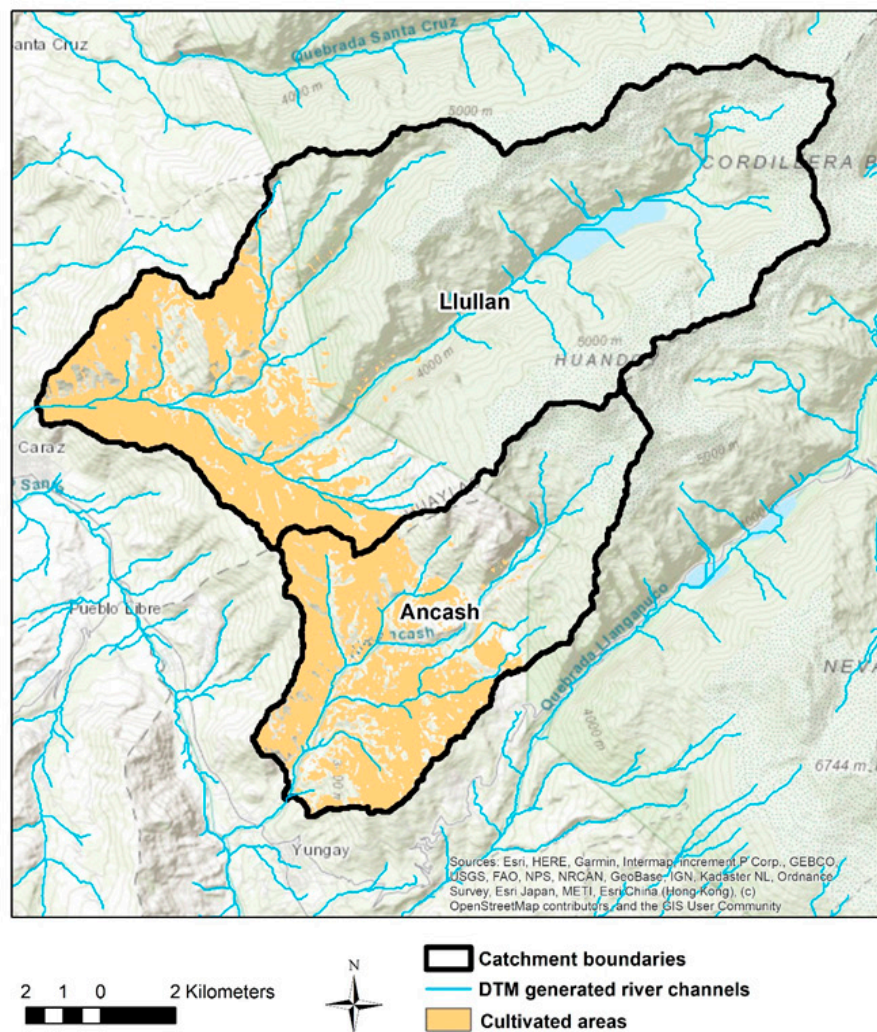


Figure 4. Details of the topography, drainage and extent of cultivated areas for the Cordillera Blanca study catchments with the outlets at -77.804, -9.035 decimal degrees for the Río Lullán and -77.745, -9.128 decimal degrees for the Río Ancash.

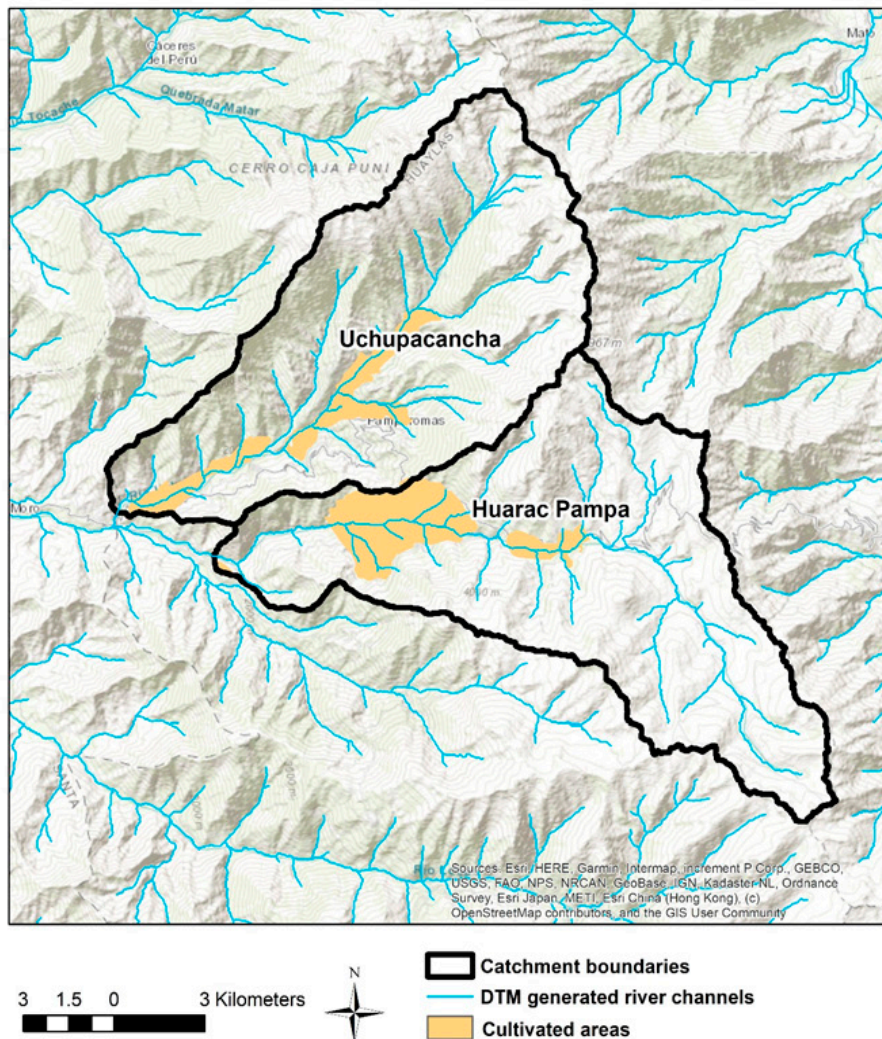


Figure 5. Details of the topography, drainage and extent of cultivated areas for the Cordillera Negra study catchments with the outlets at $-78.058, -9.101$ decimal degrees for the Río Uchupacancha and $-78.030, -9.116$ decimal degrees for the Río Huarac Pampa.

3D). In the CB, irrigation coupled with the constant air temperature allows a greater crop variety and productivity and continual growing all year. For this reason, agriculture is more productive and profitable to local CB farming communities, and the communities are comparatively better off than in other areas, such as the CN, where water is scarce. In the CB, the farmers irrigate once every eight days during the dry season. Irrigation channels are used to flood a field before (at least once) and soon after (a few times) planting. Irrigation is managed by committee for different canals. These committees include officers elected democratically on a temporary and rotational basis by local *comuneros* (community members), mostly male heads of families, as part of their communal duties. Therefore, all *comuneros* participate at different stages of their lives in local (and communal) irrigation management.

The available water for crops was quantified through initial field measurements of river and irrigation canal

discharge and existing precipitation data (Figure 3E). The crop water requirements were estimated using the Food and Agriculture Organisation CROPWAT (version 8) model which is freely available computer software which uses soil, climate and crop data as inputs (Smith, 1992). Water use, effective rainfall and the irrigation requirement, all expressed in millimetres over the growing season, were estimated for each crop grown in the CB and CN. The variation in crop water requirement with altitude was small so the results for the mean altitude were taken for each crop type, and the crop water requirement was multiplied by the crop area to estimate the total water volume requirement in each catchment. The crop area was estimated from satellite imagery and vegetation mapping. Our community workshop in Huaraz (see <https://arcg.is/0rLeXm> [English version]; <https://arcg.is/19yWum> [Spanish version]), and pre-existing mapping of the irrigation canal system in the Río Ancash, allowed the extent of the irrigation canal system to be understood and mapped in part, along with

an understanding of the community use of water and irrigation scheduling. The climate change impact on crop water demand and water supply during the 2030s was considered in further CROPWAT simulations by increasing all the air temperatures by 4 °C and assuming a 15% increase in precipitation for the CB and a 15% decrease in precipitation for the CN catchments in line with recent climate change projections for the Ancash region (Obregón et al., 2009).

Overall, our findings suggest that crops are not grown at their potential yield in either high valleys of the CB or CN. In the CB, this is because much of the irrigation water bypasses the high valleys during the dry season and flows downstream to the larger growers on the floor of the Río Santa. In the CN, the yields are low because precipitation is low. Our initial assessment suggests that climate change will make things worse in both the CN and CB. In the CB, an increase in effective rainfall is projected but this does not offset the larger increase in crop water requirements due to higher air temperatures, so irrigation requirements will become higher. In the CN, lower projected precipitation will further reduce the water available for growing. Future research will further detail the mapping of the irrigation system and crops grown to allow refinement of the catchment water balances. At present, regional estimates of crop cultivation areas are assumed representative of the local crop cultivation in the study catchments.

Lessons from the Past: Rural Development Responses to Climate Change

As has been shown throughout this article, climate change has affected Andean communities during several key periods over the past 1500 years. It has also been demonstrated that these communities attempted to adapt to these changes – in particular those relating to prolonged droughts such as the period after AD ~900. Given this, it is worth examining which of these adaptations were successful and which were less so and to see whether certain strategies could be replicated or at least partially so today. The evidence shows that huge efforts were made to improve water related infrastructure such as reservoirs, dams, canals and *amunas* (see below) and to building agricultural terraces on a massive scale throughout much of the highlands and coastal areas by different pre-Hispanic civilizations. A number of NGOs and also governmental organisations working in Peru have been implementing projects to rehabilitate some of this ancient agricultural and hydrological infrastructure, often with very positive results (Junta de Desarrollo Distrital de Pamparomás, 2000; Herrera Wassilowsky, 2012; Herrera, 2017). Some of the best examples include the following.

Asociación Bartolomé Aripaylla (ABA): Located in the community of Quispillaccta in the district of Chuschi in Ayacucho, this organisation is run by a local family and has been very successful in adopting the pre-Hispanic practices of capturing water during the wet

season in a series of large and small lakes and reservoirs, some of which have been rehabilitated and some of which have been newly constructed. This water is stored until required for irrigation. **Descosur:** This NGO spent many years working in the Colca Canyon in Arequipa, carrying out many different activities including the rehabilitation of 858 hectares of agricultural terraces benefiting nearly 1400 families. **Condesan:** This organisation, with offices both in Peru and Ecuador, is dedicated to the sustainable management of resources and is particularly interested in promoting nature-based strategies. One of their major projects has been the rehabilitation of *amunas* in the community of Huamantanga (Lima region). Here, pre-Hispanic populations constructed a series of canals to take rainwater to areas where the geology allowed the water to flow underground into subterranean deposits. These then filter-down and feed springs located lower down the valley (Duputis, 2021). **Agro Rural:** This governmental organisation ran a pilot project to rehabilitate 150 hectares of andenes between 2011 and 2014 in Matucana in the Lima region, thus benefitting 240 families.

A major part of rehabilitation programs in the Andes has entailed the restoration of terraces or *andenes* (e.g., Llerena, Inbar and Benavides, 2004; Posthumus and de Graaf, 2005; Posthumus and Stroosnijder, 2010; Willems et al., 2021). In this regard, perhaps the best example is the work carried out by **The Cusichaca Trust** from 1977 onwards. The Cusichaca Trust (CT) (a UK based charity) was founded by Dr Ann Kendall initially to carry out archaeological excavations around the community of Chamana at the base of the Cusichaca Valley within the Vilcanota Valley in the Cusco region (Kendall, 2005; Kendall and Rodríguez, 2009). One of the first studies undertaken at Chamana was of the pre-Hispanic agricultural systems located nearby. It was observed that the productive area during Inca times had been greater than at present. One of the main reasons for this was the extensive use of areas of agricultural terraces, which are found throughout the sacred valley. Partly as a result of these studies, both CT and its Peruvian partner **Asociación Andina Cusichaca (AAC)** began to implement a series of rural development projects in Chamana and subsequently in the Patacancha Valley, Ollantaytambo, Cuzco and in the Chicha Soras and Sondondo valleys in the Apurimac and Ayacucho regions (Kendall, Aguirre-Morales and Aramburú, 2006; Kendall and Chepstow-Lusty, 2006).

One of the key goals was the recovery of prehispanic agricultural systems in each valley using primarily the original methods and materials (Kendall, 2004). CT and AAC combined to:

- Rehabilitate 490 hectares of *andenes* and to put these back into production.
- Rehabilitate 24 km of canals using prehispanic technologies.
- Restore six ancient stone and clay-lined reservoirs.
- Restore one complete *amuna* in the district of Pampachiri, including the protection of the springs

- and improvements to the pre-irrigation storage lake.
- Increase the capacity of over 10 lakes and reservoirs.
- Carry out full inventories of the agricultural terraces in the Chicha Soras and Sondondo valleys and of seven districts within the Nor Yauyos Cochabambas reserve.

All of this work was supported by archaeological excavations on the agricultural terraces, canals and reservoirs. Additionally, studies of past climate and environmental change were undertaken through the analysis of sediments and sub-fossil biological remains within wetlands (lakes and peat bogs) in both the Patacancha and Chicha Soras valleys (e.g., Chepstow-Lusty et al., 2003; Kemp et al., 2006; Branch et al., 2007). These studies provided key information on former land-use histories, and the environmental and human response to climate change, which complemented the archaeological and rural development work. Some of the key benefits of the work carried out by CT and AAC included:

- The use of locally available materials has meant that the communities are less reliant on outside help in order to maintain the infrastructure.
- Production on rehabilitated terraces is between 30% and 80% higher than on sloping fields at the same altitude.
- Approximately 20% of the water is required to irrigate terraced fields compared with sloping field systems.
- Soil erosion has been reduced massively.
- Improved lakes, the protection of springs and the recovery of *amunas* has meant that lakes have not dried up and that new springs have appeared within the valleys.

This work continues in the study area presented here with a project to rehabilitate a pre-Hispanic water dam, Ricococha Alta, located in the Rico tributary of the upper Chaclancayo Basin at 4450 m a.s.l. (Figure 3F). Working together with AAC, the Pamparomás authorities led by the Mayor Guillermo Palmadera and NGO's ECLOSIO and Junta de Desarrollo de Pamparomás, this new project aims to restore to working order a dam using a combination of modern technology and ancestral indigenous knowhow. This pilot project aims to address local water security issues through the re-use of existing abandoned but recoverable pre-Hispanic installed hydraulic structural capacity (Lane, 2019).

Clearly not all attempts to restore ancient agricultural systems will bring positive results, but there are some key approaches that may meet the challenges of climate change in the Ancash region, creating long-term benefits. These include:

- Identifying communities that retain at least partially the traditional social systems based upon a shared work ethic and where ideally the population still has a high percentage of young farmers present.
- Working in an area for a long continuous period and employing staff who are happy to live in the

communities and who speak the local language.

- Listening to the local families and not imposing ideas upon them.
- Offering a very thorough training program before, during and after any intervention.
- Include follow up activities such as crop management and market training once the infrastructure has been rehabilitated.

Concluding Comments

The preliminary findings from the pilot research project 'Adaptive Capacity of Farming Communities to Climate Change in the Peruvian Andes (ACCESS)' have shown that there is considerable concern expressed by local communities in the Cordillera Blanca and Cordillera Negra (Ancash region) about the impact of climate change. These concerns include water shortages, increasing temperatures and glacier retreat, soil degradation, and greater problems with crop pests. These concerns appear to be exacerbated by a shortage of agricultural land, conflict between communities and a lack of state intervention. Drawing upon their knowledge, expertise and experience of working and living in these cordilleras, these communities have a great appreciation of the adaptive strategies required for a sustainable future, especially improved water management, economic diversification, greater community collaboration and state investment. Indeed, there is a clear willingness to embrace new ideas and to work in partnership with NGOs and universities, which is exemplified by the project to rehabilitate the pre-Hispanic water dam at Ricococha Alta in the CN. This piece of research-led rural development is being coordinated by several members of the ACCESS project team and draws upon previous archaeological surveys and the preliminary findings of both the ethnographic data and hydrological modelling. It demonstrates the considerable potential of restoring and utilising ancient water management infrastructure as part of an adaptive strategy to deal with the impact of climate change and reduced water availability. The hydrological modelling has also reinforced wider concerns about rising temperatures and increased variability in precipitation patterns, and the need to improve water management in both cordilleras to maintain effective levels of irrigation. This will help to reduce vulnerability (social, economic and environmental) and hopefully ensure a more sustainable future for farming and economic development. Our review of past climate change has demonstrated that variability of the South American Summer Monsoon (SASM) and the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), as well as the El Niño Southern Oscillation (ENSO), has led to periods of significantly higher or lower precipitation in the past. The response of human communities in Ancash remains to be fully understood because of temporal uncertainties within archaeological data. Nevertheless, the abundance of well-preserved agricultural and water management infrastructure for specific cultural periods clearly indicates that human communities put a high demand on available water resources but also recognised

the need for water conservation. The preliminary findings presented here have provided the basis for ongoing research in the CB and CN, as well as the regions of Ayacucho and Apurimac, which we hope will continue to improve our understanding of the adaptive capacity of farming communities to climate change in the Peruvian Andes: past, present and future.

Acknowledgements

We are grateful to the following communities and organisations for their assistance during the ACCESS pilot project: Unidos Venceremos village (CB), Pamparomás village (CN), Junta de Desarrollo Distrital de Pamparomás (CN), Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (Huaraz), Ministerio de Cultura (Huaraz), ECLOSIO (University of Liège, Lima and Pamparomás) and Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM, Huaraz). Thank you to the British Academy for providing the funding for the research project (KF2\100158), and to the Academy of Medical Sciences for funding the initial networking programme (Food Production and Climate Resilience in Peru: Past, Present and Future (GCRFNG\100411)).

References

- Aibar Ozejo, E. (1968). La visita de Guaraz en 1558. Cuadernos del Seminario de Historia. *Instituto Riva Agüero*, 9, 5-21.
- Apaéstegui, J., Cruz, F. W., Sifeddine, A., Vuille, M., Espinoza, J. C., Guyot, J. L., Khodri, M., Strikis, N., Santos, R. V., Cheng, H., Edwards, L., Carvalho, E. and Santini, W. (2014). Hydroclimate variability of the northwestern Amazon Basin near the Andean foothills of Peru related to the South American Monsoon System during the last 1600 years. *Climate of the Past*, 10, 1967-1981.
- Arkush, E. and Tung, T. A. (2013). Patterns of war in the Andes from the Archaic to the Late Horizon: Insights from settlement patterns and cranial trauma. *Journal of Archaeological Research* 21, 307-69.
- Aste Cannock, N. (2018). *Evaluación de la demanda hídrica agrícola actual y futuros riesgos en la costa peruana mediante el caso del Proyecto Especial Chavimochic, La Libertad*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Masters thesis.
- Barrett, T., Feola, G., Krylova, V. and Khusnitdinova, M. (2017). The application of Rapid Appraisal of Agricultural Innovation Systems (RAAIS) to agricultural adaptation to climate change in Kazakhstan: A critical evaluation. *Agricultural Systems*, 151, 106-113.
- Bird, B. W., Abbott, M. B., Vuille, M., Rodbell, D. T., Stansell, N.D. and Rosenmeier, M. F. (2011). A 2300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 8583-8588.
- Branch, N. P., Kemp, R. A., Silva, B., Meddens, F. M., Williams, A., Kendall, A. and Pomacanchari, C. V. (2007). Testing the sustainability and sensitivity to climatic change of terrace agricultural systems in the Peruvian Andes: A pilot study. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1-9.
- Carey, M., French, A. and O'Brien, E. (2012). Unintended effects of technology on climate change adaptation: An historical analysis of water conflicts below Andean glaciers. *Journal of Historical Geography*, 38, 181-191.
- Chepstow-Lusty, A., Frogley, M. R., Bauer, B. S., Bush, M. B. and Tupaychi Herrera, A. (2003). A late Holocene record of arid events from the Cuzco region, Peru. *Journal of Quaternary Science*, 18, 491-502.
- Chepstow-Lusty, A. (2011). Agro-pastoralism and social change in the Cuzco heartland of Peru: A brief history using environmental proxies. *Antiquity*, 85, 570-82.
- Cook, N. D. (1981). *Demographic collapse: Indian Peru, 1520-1620*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Cook, N. D. (1998). *Born to die: Disease and New World conquest, 1492-1650*. Cambridge, University of Cambridge Press.
- Denevan, W. M. (2001). *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes*. Oxford Geographical and Environmental Studies Series. Oxford, Oxford University Press.
- Dillehay, T. D., Rossen, J. and Netherley, P. J. (1997). The Nanchoc tradition: The beginnings of Andean civilization. *American Scientist*, 85, 46-56.
- Duputis, E. (2021). *Políticas de cambio climático en los Andes: Diálogo entre escalas y saberes para la adaptación. Propuestas Andinas 18*. Quito: Adaptación a las Alturas. Programa Bosques Andinos. CONDESAN.
- Duviols, P. (1973). Huari y llacuz: Agricultores y pastores. Un dualismo prehispánico de oposición y complementariedad. *Revista del Museo Nacional*, 39, 153-91.
- Ferreira, F. (2012). *Back to the village? An ethnographic study of an Andean community in the early twenty-first century*. PhD thesis. Royal Holloway, University of London.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R. and Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281, 180-195.
- Grimm, A. M. and Zilli, M. T. (2009). Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. *Journal of Climate*, 22, 2257-2275.
- Haug, G. H., Hughen, K., Sigman, D. M., Peterson, L. C. and Röhl, U. (2001). Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 293, 1304-1308.
- Herrera, A. (2017). Turismo patrimonial, identidad y desarrollo en el Perú. *Indiana*, 34, 199-231.
- Herrera Wassilowsky, A. (2012). *La recuperación de tecnologías indígenas. Arqueología, tecnología y desarrollo en los Andes*. Estudios de la Sociedad Rural 41. Bogotá and Lima, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Sociales, Departamento de Antropología; CLACSO; IEP; PUNKU, Centro de Investigación Andina.

- Junta de Desarrollo Distrital de Pamparomás (2000). *Proyecto: Uso productivo del agua y desarrollo agroecológico de la microcuenca Chaclancaya*. Pamparomás, Peru, Junta de Desarrollo Distrital de Pamparomás.
- Kanner, L. C., Burns, S. J., Cheng, H., Edwards, R. L. and Vuille, M. (2013). High-resolution variability of the South American summer monsoon over the last seven millennia: Insights from a speleothem record from the central Peruvian Andes. *Quaternary Science Reviews*, 75, 1–10.
- Kemp, R. A., Branch, N. P., Silva, B., Meddens, F., Williams, A., Kendall, A. and Pomacanchari, C. V. (2006). Pedosedimentary, cultural and environmental significance of palaeosols within pre-Hispanic agricultural terraces in the southern Peruvian Andes. *Quaternary International*, 158, 13–22.
- Kendall, A. (2004). Restauración de canales y andenes agrícolas prehispánicos en los Andes usando tecnología tradicional y apropiada. In Llerena, C. A., Inbar, M. and Benavides, M. A. (Eds.). *Conservación y abandono de andenes*. Lima, Universidad Agraria La Molina y Universidad de Haifa.
- Kendall, A. (2005). Applied archaeology: Revitalizing indigenous agricultural technology within an Andean community. *Public Archaeology*, 4, 205–221.
- Kendall, A. y Chepstow-Lusty, A., (2006). Cultural and environmental change in the Cuzco region of Peru: The rural development implications of combined archaeological and palaeoecological evidence. In Dransart, P. (Ed.). *Kay Pacha: Cultivating earth and water in the Andes*. British Archaeological Reports (BAR) S1478, 185–197.
- Kendall, A., Aguirre-Morales M. and Aramburú, D. (2006). *Excavaciones en Andamarca*. Informe, Cusichaca Trust, Andahuaylas, Perú.
- Kendall, A. and Rodríguez, A. (2009). *Desarrollo y perspectivas de los sistemas de andenería de los Andes centrales del Perú*. Cuzco, Institut Français d'Études Andines.
- Kirkland, E. (2012). Indigenous knowledge and climate change adaptation in the Peruvian Andes. *Political Economy of the Environment in Latin America (INTL1450)*, 1–37.
- Kosok, P. (1965). *Life, land, and water in ancient Peru; An account of the discovery, exploration, and mapping of ancient pyramids, canals, roads, towns, walls, and fortresses of coastal Peru with observations of various aspects of Peruvian life, both ancient and modern*. New York, Long Island University Press.
- Lane, K. (2006). *Engineering the puna: The hydraulics of agro-pastoral communities in a north-central Peruvian valley*. PhD thesis. Cambridge, University of Cambridge.
- Lane, K. (2009). Engineered highlands: The social organisation of water in the ancient north-central Andes (AD 1000–1480). *World Archaeology*, 41, 169–90.
- Lane, K. (2014). Water technology in the Andes. In Selin, H. (Ed.). *Encyclopaedia of the history of science, technology, and medicine in non-Western cultures*, 1–24. New York, Springer.
- Lane, K. (2017). Water, silt and dams: Prehispanic geological storage in the Cordillera Negra, north-central Andes, Peru. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2, 41–50.
- Lane, K. (2019). High Altitude Andean Rehabilitation of Dams Project (HAARD), Cordillera Negra, central Andes, Peru. Gerda Henkel Humanitarian Aid and Social Welfare Projects - Accompanying Social Measures Initiative. Germany, Gerda Henkel Stiftung.
- Levillier, R. (1926). *Gobernantes de Perú: Cartas y papeles siglo XVI: El Virrey García de Hurtado de Mendoza, Marques de Cañete*. Vol. XIII: Segunda Parte (Documentos del Archivo de Indias). Madrid, Colección de Publicaciones Históricas de la Biblioteca de Congreso Argentino.
- Llerena, C. A., Inbar, M. and Benavides, M. A. (Eds.) (2004). *Conservación y abandono de andenes*. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina, Universidad de Haifa.
- Lynch, T. F. (1971). Pre-ceramic transhumance in the Callejón de Huaylas. *American Antiquity*, 36, 139–48.
- Mark, B. G. and McKenzie, J. M. (2007). Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water. *Environmental Science & Technology*, 41, 6955–60.
- Maza, J. (2017). Introducción al estudio arqueológico del canal prehispánico Huiru Catac, cuenca alta de Nepeña: Tecnología hidráulica para integrar la puna, los valles interandinos y la costa. *Arkinka*, 265.
- McKinney, D. C., Anderson, G. and Byers, A. (2011). *Adaptation to climate change: Case study – Glacial retreat and adaptation options in Peru's Río Santa basin (draft final)*. United States Agency for International Development (USAID).
- Obregón, G., Díaz, A., Rosas, G., Acuña, D., Avalos, G., Oria, C., Llacza, A. (2009). *Escenarios climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030 – Resumen técnico. Segunda comunicación nacional de cambio climático*. Lima, SENAMHI.
- Orlarte Navarro, B. (2007). La cuenca del río Chillón: Problemática y potencial productivo. *Ingeniería Industrial*, 25, 53–68.
- Orlove, B. S. (2020). A minority of Peruvian mountain farmers benefit from government pandemic programs. *GlacierHub*.
- Orloff, C. R. (2010). *Water engineering in the ancient world: Archaeological and climate perspectives on societies of ancient South America, the Middle East, and South-East Asia*. Oxford, Oxford University Press.
- Posthumus, H. and de Graaff, J. (2005). Cost-benefit analysis of bench terraces, a case study in Peru. *Land Degradation & Development*, 16, 1–11.
- Posthumus, H. and Stroosnijder, L. (2010). To terrace or not: The short-term impact of bench terraces on soil properties and crop response in the Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability*, 12, 263–276.
- Pramova, E., di Gregorio, M. and Locatelli, B. (2015). *Integrating adaptation and mitigation in climate change and land-use policies in Peru*. Working paper 184, Bogor, Indonesia, CIFOR.
- Raimondi, A. (1874). *El Peru, Tomo I, Parte Preliminar*. Lima: Imprenta del Estado.
- Raymond, A. M., Delgado-Arias, S. and Elder, R. C. (2012). Technological solutions for climate change adaptation in

- the Peruvian highlands. In Chhetri, N. (Ed.). *Human and social dimensions of climate change*, 3-30. Open Access: InTech.
- Rasmussen, M. B. (2015). *Andean waterways: Resource politics in highland Peru*. Seattle and London, University of Washington State.
- Rein, R., Lückge, A. and Sirocko, F. (2002). A major Holocene ENSO anomaly during the medieval period. *Geophysical Research Letters*, 31, L17211, 1-4.
- Rein, B., Lückge, A., Reinhardt, L., Sirocko, F., Wolf, A. and Dullo, W-D. (2005). El Niño variability off Peru during the last 20,000 years. *Paleoceanography*, 20, PA4003, 1-17.
- Reuter, J., Stott, L., Khider, D., Sinha, A., Cheng, H., and Edwards, R. L. (2009). A new perspective on the hydroclimate variability in northern South America during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, 36, L21706, 1-5.
- Sandweiss, D. H., Andrus, C. F. T., Kelley, A. R., Maasch, K. A., Reitz, E. J. and Roscoe, P. B. (2020). Archaeological climate proxies and the complexities of reconstructing Holocene El Niño in coastal Peru. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 8271-8279.
- Schoolmeester, T., Saravia, M., Andresen, M., Postigo, J., Valverde, A., Jurej, M., Alfthan, B. and Giada, S. (2016). *Outlook on climate change adaptation in the tropical Andes mountains Mountain Adaptation Outlook Series*. Nairobi, Arendal, Vienna and Lima, United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal and CONDESAN.
- Schut, M., Klerkx, L., Rodenburg, J., Kayeke, J., Hinnou, L. C., Raboanarielina, C.M. and Bastiaans, L. (2015). RAAIS: Rapid Appraisal of Agricultural Innovation Systems (Part I). A diagnostic tool for integrated analysis of complex problems and innovation capacity. *Agricultural Systems*, 132: 1-11.
- Seltzer, G., Rodbell, D. and Burns, S. (2000). Isotopic evidence for late Quaternary climatic change in tropical South America. *Geology*, 28, 35-38.
- Skarbo, K. y Lambrou, J. (2015). Maize migration - Key crop expands to higher altitudes under climate change in the Andes. *Climate and Development*, 8(3), 245-255.
- Smith, M. (1992). *CROPWAT, A computer program for irrigation planning and management*. FAO Irrigation and Drainage Paper 46. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- Stansell, N. D., Rodbell, D. T., Abbott, M. B. and Mark, B. G. (2013). Proglacial lake sediment records of Holocene climate change in the western cordillera of Peru. *Quaternary Science Reviews*, 70, 1-14.
- Stansell, N. D., Licciardi, J. M., Rodbell, D. T. and Mark, B. G. (2017). Tropical ocean-atmospheric forcing of Late Glacial and Holocene glacier fluctuations in the Cordillera Blanca, Peru. *Geophysical Research Letters*, 44, 4176-4185.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Lin, P.-N., Henderson, K. A., Cole-Dai, J., Bolzan, J. F. and Liu, K.-B. (1995). Late Glacial Stage and Holocene tropical ice core records from Huascaran, Peru. *Science*, 269, 46-50.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Davis, M.E., Zagorodnov, V. S., Howat, I. M., Mikhalevko, V. N. and Lin, P.-N. (2013). Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past ~1800 years. *Science*, 340, 945-950.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E. and Porter, S. E. (2017). Ice core records of climate and environmental variability in the tropical Andes of Peru: Past, present and future. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 25-40.
- Torres, J., Frías, C. and de la Torre, C. (2014). *Adaptación al cambio climático en zonas de montaña*. Practical Action Consulting. Lima, Soluciones Prácticas.
- Tremolada, P., Villa, S., Bazzarin, P., Bizzotto, E., Comolli, R. and Vighi, M. (2008). POPs in mountain soils from the Alps and Andes: Suggestions for a 'precipitation effect' on altitudinal gradients. *Water, Air, and Soil Pollution*, 188, 93-109.
- USAID (United States Agency for International Development). (2011). *Peru climate change vulnerability and adaptation desktop study*. Written for USAID under the Climate Change Resilient Development Task Order, Washington, D.C., USAID.
- Valdivia, C., Seth, A., Gilles, J. L., García, M., Jiménez, E., Cusicanqui, J. and Yucra, E. (2010). Adapting to climate change in Andean ecosystems: Landscapes, capitals, and perceptions shaping rural livelihood strategies and linking knowledge systems. *Annals of the Association of American Geographers*, 100, 818-834.
- Vuille, M., Burns, S. J., Taylor, B. L., Cruz, F. W., Bird, B. W., Abbott, M. B., Kanner, L. C., Cheng, H. and Novello, V. F. (2012). A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Climate of the Past*, 8, 1309-1321.
- Walshe, R. and Argumedo, A. (2016). Ayni, ayllu, yanatin and chanincha: The cultural values enabling adaptation to climate change in communities of the Potato Park, in the Peruvian Andes. *GAIA*, 25 (3), 166-173.
- Willems, B., Leyva-Molina, W. M., Taboada-Hermoza, R., Bonnesoeur, V., Román, F., Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W. and Walsh, D. (2021). *Impactos de andenes y terrazas en el agua y los suelos: ¿qué sabemos? Resumen de políticas, Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica"*. Lima, Forest Trends.

Repeat Photography of Erwin Schneider's 1932-1960 Cartographic Expeditions to the Peruvian Andes and Nepal Himalaya: New Opportunities for Future High Mountain Research

Fotografía Repetitiva de las Expediciones Cartográficas de Erwin Schneider de 1932-1960 a los Andes Peruanos y al Himalaya de Nepal: Nuevas Oportunidades para la Investigación Futura en Alta Montaña

Alton C. Byers¹

¹ Senior Research Affiliate, Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR), University of Colorado/Boulder

Abstract

Erwin Schneider was an Austrian mountaineer who is well remembered for his pioneering first ascents of 6000-7000 m peaks in the Alps, Pamirs, and Andes during the 1920s and 1930s. He is equally remembered for his unparalleled cartographic skills that produced some of the first detailed maps of high mountain ranges within the European Alps, Peruvian Andes, Nepal Himalaya, and East African Highlands. For the past several decades, the replication of his high mountain photographs of the Andes and Himalayas have provided “windows into the past” for scientists interested in studying the impacts of contemporary climate change upon glaciers, glacial lakes, and other cryospheric phenomena. These photographs, contrasted with their recent replicates, have also provided valuable insights regarding contemporary changes in the cultural landscapes of the high mountains of Nepal and Peru. Hundreds of Schneider's other photographs, most of which have yet to be replicated, are archived in a number of institutions in Austria and Germany that are accessible, or will be accessible, to scientists and educators within the near future. Many other collections of historic mountain photographs from the world's high mountain ranges also exist, taken in the course of climbing expeditions, research expeditions, or engineering projects during the early to mid-20th century. Most of these collections are in urgent need of proper scanning, cataloging, and storage in order to preserve them for future generations of mountain scientists and educators.

Keywords: *Repeat photography, Erwin Schneider, Peruvian Andes, Nepal Himalaya*

Resumen

Erwin Schneider fue un alpinista austriaco muy recordado por sus primeras ascensiones pioneras a picos de 6000-7000 m en los Alpes, Pamir y los Andes durante las décadas de 1920 y 1930. Es igualmente recordado por sus incomparables habilidades cartográficas que produjeron algunos de los primeros mapas detallados de las altas cadenas montañosas de los Alpes europeos, los Andes peruanos, el Himalaya de Nepal y las tierras altas de África oriental. Durante las últimas décadas, la reproducción de sus fotografías de alta montaña de los Andes y el Himalaya ha proporcionado “ventanas al pasado” para los científicos interesados en estudiar los impactos del cambio climático contemporáneo sobre los glaciares, los lagos glaciares y otros fenómenos criosféricos. Estas fotografías, contrastadas con sus réplicas recientes, también han brindado información valiosa sobre los cambios contemporáneos en los paisajes culturales de las altas montañas de Nepal y Perú. Cientos de otras fotografías de Schneider, la mayoría de las cuales aún no han sido replicadas, están archivadas en varias instituciones en Austria y Alemania que son accesibles, o lo serán, para científicos y educadores en un futuro cercano. También existen muchas otras colecciones de fotografías históricas de montañas de las cadenas montañosas más altas del mundo, tomadas en el curso de expediciones de escalada, expediciones de investigación o proyectos de ingeniería entre principios y mediados del siglo XX. La mayoría de estas colecciones necesitan urgentemente un escaneo, catalogación y almacenamiento adecuados para preservarlas para las futuras generaciones de científicos y educadores de las montañas.

Palabras clave: *Fotografía repetitiva, Erwin Schneider, Andes peruanos, Nepal Himalaya*

Introduction

The mountaineer and cartographer Erwin Schneider was born on 13 April, 1906 in Jáchymov, in what is now the Czech Republic (Figures 1 and 2). He completed his early schooling in Idria, Slovenia and Salzburg, Austria, enrolling in the Technical University of Charlottenburg in Berlin, Germany, to study mining between 1924 and 1934.

During the mid-1920s to mid-1930s, Schneider also established a reputation as being one of Europe's top alpinists. As a member of the German-Soviet Alay-Pamir Expedition in 1928, he made the first ascent of Lenin Peak (7134 m) (since renamed Avicenna Peak) in the former Soviet Union, at the time an exciting and new high altitude record. It was here that Schneider first became interested in cartography while working as an aide to mapmakers Richard Finsterwalder and Hans Biersack, who together took over 400 photogrammetric images of the region. Schneider would later complete his cartographic training in Hannover, Germany (H. Schneider, pers. comm., October 29, 2021). In 1930, he was a member of the International Himalaya Expedition (IHE) to Kanchenjunga, led by G. O. Dyhrenfurth. Approaching the mountain from the Nepal (eastern) side, Schneider reached four more 7000 m peaks (Smythe, 1930), earning him the nickname of "King of the Seven Thousand Meter Peaks" (German: *Siebentausenderkönig*).

Today he is also remembered for his unparalleled cartographic skills in some of the world's most beautiful high mountain regions. In 1932 and 1936, Schneider worked as cartographer and mountaineer with the Deutscher und Österreichischer Alpenverein (DÖAV, or German and Austrian Alpine Associations) expeditions to the cordilleras Blanca and Huayhuash in Peru (Kinzl, 1940). In addition to making first ascents of nine 6000+ meter peaks in the Cordillera Blanca, Schneider's high altitude photogrammetric work also produced the first detailed maps of both ranges. He also co-authored the beautiful book *Cordillera Blanca* with Austrian geographer

Hans Kinzl (Kinzl and Schneider, 1950; Byers and Kolff, 1997; Byers, 1999; Hoerlin, 2011; Carey et al., 2016). Schneider continued his relationship with the DÖAV well into the 1960s, producing, along with the famous Austrian cartographer Fritz Ebster, a series of beautiful modern maps of ranges within the Austrian and Bavarian mountain groups at a scale of 1:25,000 (Hoffman, 1987).

In 1939, Schneider lost all of his toes during a winter climb of the Cima Di Vazzeda in Switzerland. In spite of this misfortune, he learned to use his feet without toes, continued climbing, and returned to Nepal's Mt. Everest region as part of the International Himalaya Expedition (IHE) led by Norman G. Dyhrenfurth in 1955. Although the climbing team was unable to achieve its objective of a first ascent on Lhotse (8516 m), Schneider's photogrammetric survey of the region, supported by the Fritz Thyssen-Stiftung and the Council of High Alpine Research, resulted in one of the prominent high altitude maps of the 20th century, the Mount Everest map of 1957 (see Schneider, 1963).

Beginning in 1960, Schneider expanded his work in Nepal to cover several different regions that ultimately produced maps of the Khumbu Himal (published in 1965), Tamba Koshi-Likhu Khola (1968), Dudh Kosi and Shorong/Hinku (1974), Lapchi Kang (1974), Rolwaling (1974, second edition 1992), Kathmandu Valley (1977), and Langtang Himal (second edition completed in 1990) (Taragon Museum, 2016). To this day, all of the maps produced are popularly referred to as the "Schneider Maps." The maps are two-dimensional representations of some of the most challenging, and beautiful, mountainous regions in the world, and are further testimony to Schneider's phenomenal strength as a mountaineer and perseverance as a scientist.

As one example of Schneider's fortitude, the late Sonam Hishi Sherpa of Namche Bazaar in the Everest region, who had met Schneider in the late 1950s, told me of how Schneider had once become lost in the remote Barun Valley to the east of Everest while mapping the



Figure 1. (left). Erwin Schneider at work in 1955, during the International Expedition to Lhotse organized by Norman Dyhrenfurth, which ultimately resulted in the first detailed map of the Mt. Everest region. Figure 2. (right). Schneider arranging his ski bindings in preparation for his ski down the Khumbu icefall with Ernst Senn and Bruno Spirig (photographs most likely taken by Norman Dyhrenfurth, provided courtesy of the Erwin Schneider Archiv Lech a/A).

Hinku/Hongu region. His team quickly ran out of food, and faced the possibility of starvation and death in the nearly impenetrable rhododendron forests of the lower Hongu River. This was avoided, however, several days before the team figured out a way out to the first village they had seen in weeks—by boiling and eating their leather belts and boots!

Recognizing Schneider's remarkable achievements to science and education, the University of Innsbruck bestowed him with the title "Professor" in 1975. Just prior to the publication of a special issue of *Mountain Research and Development* celebrating his life and achievements, Erwin Schneider passed away on August 17, 1987, after a long and distinguished career in mountaineering and cartography.

The Photographs

In the course of Schneider's cartographic expeditions to the Andes and Himalaya, he produced hundreds of photogrammetric images from high altitude photopoints as part of the map-making process at the time. It was inevitable that, given enough time, these images would attain additional value for their historical documentation of the landscapes, villages, and glaciers in Peru and Nepal as they existed during the 1930s and 1950s, respectively.

I first encountered Schneider's photographs in 1984, when I lived for a year in the Mt. Everest region of Nepal as part of my doctoral research at the University of Colorado, Boulder (Byers, 1987). Dr. Daniel Vuichard, a Swiss geologist who was visiting the region at the time, learned of my interest in land use and landscape change, and gave me a large folder of second-generation images from Schneider's 1955 cartographic work in Khumbu. Following in the footsteps of pioneer mountain geographer Dr. Jack D. Ives (Ives, 1986), Vuichard would later author one of the first definitive papers on glacial lake outburst floods in the region (Vuichard and Zimmermann 1986).

Both Daniel and I were funded by the circa 1970s-1980s mountain programs of the United Nations University (UNU) in Tokyo, Japan (<https://unu.edu>). At the time, the UNU had a particular interest in testing the then-popular "crisis in the mountains" scenarios being promoted by governments and development agencies worldwide (see Eckholm, 1975; Ives and Messerli, 1989). The problem, however, was that the popular linkages between overpopulation, deforestation, and catastrophic soil erosion were supported by little in the way of reliable data or information, thus the UNU's interest in testing the various "doomsday" hypotheses being promoted. Our jobs, then, were to try and provide some of this evidence, whether for or against the popular scenarios, through detailed, quantitative, and long-term studies of land use, soil loss, landscape change, river siltation, and other high mountain phenomena.

The photos that Daniel gave me were primarily of the Imja valley, from Namche Bazaar (3440 m) to the alpine hillslopes of Dingboche (4410 m). They consisted mostly of lower elevation landscape panoramas, with none depicting the glaciers found at the higher elevations. I replicated many of these panoramas throughout 1984 as part of a study of forest cover changes since the 1950s (Byers, 1987), and again for continued landscape change analyses in the coming years (Byers, 1997, 2003, 2005), unaware that a collection of glacier photographs existed.

In 2005, Professor Ives presented me with what remained of Swiss glaciologist Fritz Müller's 1956 photographs and research notes of the upper Khumbu glacier region of eastern Nepal (Byers, 2010a, 2017b). Müller had spent nine months in the Khumbu, living in a basecamp near the present day tourist village of Gorak Shep (5164 m) following the 1956 Swiss Everest Expedition, where he had worked as the expedition's geologist/glaciologist. His photographs and snapshots of high altitude glaciers, Sherpa research assistants, and day-to-day work in high altitude landscapes offered a fascinating window into an ice- and glacier-covered world long gone as a result of climate change.

Within the Müller archives were a number of high mountain and glacier panoramas taken by Erwin Schneider in 1955. Both Professor Ives, who was a close friend of Müller's, and Hanna Schneider, Erwin's daughter, have confirmed that Müller and Schneider were colleagues and friends who freely shared their equipment as well as photographs with one another (Figure 3 and, for modern comparison, Figure 4). This would account for the presence of Schneider's glacier panoramas from the upper Imja Khola region within the box of Müller's materials, which Schneider had presented to Müller in order to facilitate and support his glacier research in 1956 (Byers, 2008; H. Schneider, pers. comm., October 29, 2021).

Recognizing the incredible scientific value that both collections of glacier photographs presented, I thus began a series of research expeditions in 2007 with the goal of replicating both scientist's high altitude photographs of the Khumbu region (circa 1955). The resultant images of receding glaciers, new glacial lakes, and major ice loss on surrounding peaks generated a fair amount of international attention at the time (e.g., see ICIMOD 2009), most likely because of their dramatic illustrations of the impacts of climate change in the high mountains since the 1950s (Byers 2008, 2010a, 2010b, 2016, 2017b).

The establishment of The Mountain Institute's (TMI: www.mountain.org) Andean Program in 1995 gave me the opportunity to follow in Erwin Schneider's footsteps once again in another part of the high mountain world, this time in the cordilleras Blanca and Huayhuash of eastern-central Peru. In Huaraz, at the base of the ice-clad Cordillera Blanca range, I found that a number of prominent scientists had already published their studies on Andean glacier recession, with some of the publications



Figure 3. The debris-covered Imja glacier in 1955 (photograph by E. Schneider).



Figure 4. Imja glacier, now largely a large and potentially dangerous glacial lake, in 2015 (photograph by A. Byers).

containing what were now the historic photographs of either Erwin Schneider or Hans Kinzl. Among them were Ing. Alcides Ames, Dr. Christian Georges, Dr. George Kaser, and Dr. Gerhard Moser (see Byers, 2000). At their recommendation, I visited the Austrian Alpine Club in Innsbruck (ÖAV) in 1997, where I found that hundreds of Schneider’s glass-plate negatives of snow peaks and glaciers in both Andean ranges had been stored. Then, as now, the Historical Archive Division of the ÖAV was extremely kind and supportive in providing access to the negatives, as well as to local facilities for making positive copies. Over the next decade, I was able to replicate many of Schneider’s photographs of glaciers and landscapes in both the cordilleras Blanca and Huayhuash (Byers and

Kolff, 1997; Byers 1999, 2000, 2017a), providing insights into changes in both the physical and cultural landscapes there over time (Figures 5 and 6).

The Photographic Archives: Copyrights and Use

Until recently, some confusion has existed regarding the location of Schneider’s photographic archives and permission to use them. In 1984, for example, I was told that the archives were “scattered throughout Europe” in various universities, or contained within private collections, such as those of Dr. Fritz Müller that I was given in the mid-2000s (see Jiduc, 2016:40). While I



Figure 5. (left) Yanapacha (5469 m) and glacier, Huascaran National Park, Peru in 1932 (photograph by E. Schneider).



Figure 6. (right) Yanapacha in 1998, showing considerable recession of the glacier during the interim period (photograph by A. Byers).

made every attempt to properly credit the source and ownership of the historic photographs that I used, there was still some uncertainty as to the actual, legal copyright privileges involved.

The situation has since been resolved. That is, the primary copyright of Schneider's photos is clearly retained by his daughter, Hanna Schneider, who works as curator of the *Erwin Schneider Archiv*, Lech am Arlberg, Austria, Schneider's home base since the 1950s. This archive consists of Schneider's

"...private working archive that is being scanned and digitized [with a] Hasselblad Flextight X1 scanner. [The collection] contains all the photographs of Erwin Schneider's private working archive, covering Europe, Central Asia, Egypt, India, Nepal, Cambodia, Kenya, and Peru, covering all walks of life, landscape (from the plains to the high grounds), and architecture. The archive is being made accessible to the general public, students and researchers alike. The digital database and website will be launched in the summer of 2023, together with a joint publication of his life and work and an exhibition there" (H. Schneider, pers. comm., October 29, 2021).

Many of Schneider's glacier and high mountain landscape photographs, archived at the Historical Archive Division of the ÖAV in Innsbruck, were recently scanned and catalogued. They contain approximately 120 photos of the Cordillera Huayhuash, 14 from the Cordillera Blanca, and 470 from various locations in Nepal, and represent only a small part of the ÖAV's entire collection of Schneider's work. Permission to use the photographs for publications, research, or educational purposes was graciously extended to the ÖAV by Hanna Schneider several years ago. In turn, permission from the ÖAV to use the photographs is normally given freely in the spirit of furthering high mountain research (M. Achraimer, pers. comm., September 21, 2021).

Another potential source of Schneider's photographs is contained in the archives of the German Alpine Club in Munich (www.historisches-alpenarchiv.org). The Alpine Club archives contain approximately 35,000 historic photographs by different photographers, arranged by mountain regions (e.g., Himalayas, Andes, Alps) as opposed to photographer (S. Ritter,

pers. comm., November 4, 2021). A quick search on "Schneider" produced a large number of photographs of Schneider himself, and more detailed searches will need to be conducted to determine if the archives also include samples of his photogrammetric work.

Practical Uses of Schneider's Photographs

Since about 2007, my own replications of Erwin Schneider's photographs from the 1930s (Peru) and 1950s (Nepal) have been used in numerous books, popular and peer reviewed publications, and global photo exhibits to illustrate the most obvious and dramatic impacts of climate change within the world's high mountains, i.e., receding glaciers. However, the photographs have also demonstrated their additional value and utility by providing insights into changes in forest cover (native and non-native), grazing impacts, cultural landscapes, and urban growth in the cordilleras Blanca and Huayhuash (Byers, 2000). Schneider's landscape panoramas of the Mt. Everest region have helped clarify the record regarding regional forest cover since the 1950s, a source of widespread debate during the 1970s through the 1990s (Eckholm, 1975; Byers, 2021; Harden and Byers, 2022) (Figures 7 and 8).

Future Photographic Replications

Efforts to replicate Schneider's photographs to date have most likely only scratched the surface of what is actually available within the ÖAV, German Alpine Club, Erwin Schneider Archives in Austria, and other sources. This presents a number of exciting opportunities for present and future scientists to document landscape change, glacial change, and other high mountain phenomena of the 20th and 21st centuries in the cordilleras Blanca and Huayhuash of Peru, and within eight ranges in Nepal (Khumbu Himal, Tamba Koshi-Likhu Khola, Dudh Kosi and Shorong/Hinku, Lapchi Kang, Rolwaling, and Langtang Himal). Likewise, Schneider's photographs of the Pamirs (1930s), Austrian and Bavarian Alps (1940s-1960s), and Mt. Kenya (1964) offer unprecedented repeat photography opportunities of high mountain landscapes elsewhere in the world.



Figure 7. 1955 panorama of the Imja valley in what is now the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Khumbu, Nepal (photograph by E. Schneider).



Figure 8. The villages of Namche Bazaar (lower left), Kunde (upper left), and Khumjung (upper right) in 2018. Note the significant tree growth that has occurred in the vicinity of Namche Bazaar (far left), a result of afforestation efforts promoted by local communities and the national park (photograph by L.S. Sherpa).

Additionally, there exist a large number of other historic photographic resources for Peru, Nepal, and dozens of other countries in the high mountain world that have yet to be adequately reproduced and studied (Figures 9 and 10). For example, decades of studies of the high mountains in Peru have been conducted by the Corporation Peruana del Santa, the Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) of the Autoridad Nacional del Agua (ANA), and by many other mountaineering expeditions (S. Wegner, pers. comm., October 10, 2021). The archives of the late Dr. Charles Houston, one of the first westerners to visit Nepal and the Mt. Everest region in 1950, have already helped to clarify debates concerning the extent of contemporary tree cover in the Khumbu region (Byers, 2005) while providing priceless documentation of pre-tourist Nepal. Nearly all of these archives, however, are in need of proper organization and indexing, as the danger of their being lost or forgotten increases with each passing year. The Leigh Ortenburger collections of photographs of the cordilleras Blanca and Huayhuash from around 1963, for example, have been carefully catalogued and archived at Stanford University in California (<https://library.stanford.edu/collections/leigh-ortenburger-collection>), and are available to researchers for scientific and educational purposes.



Figure 9. Yerupajá (ca. 1932), in the Cordillera Huayhuash, Peru, is one example of an Erwin Schneider photograph that has yet to be replicated (photograph by E. Schneider, courtesy of the ÖAV).



Figure 10. Glacier in the Langtang Himal (in 1955), Nepal, is another example of an Erwin Schneider photograph that has yet to be replicated (photograph by E. Schneider, courtesy of the ÖAV).

Books published by the various mountaineering expeditions in the Andes during the 1930s (e.g., Kinzl and Schneider, 1950) and Himalayas during the early 1950s (e.g., Hunt, 1954) provide another source of valuable glacier, landscape, and cultural photographs, most of which have yet to be properly replicated. Private collections are another source, and access can often be gained by contacting either the photographer directly or, if deceased, the next of kin.

Conclusion

Erwin Schneider's legacy as a high mountain climber and cartographer will live in perpetuity within the mountaineering and scientific communities. His work has already been used in numerous photographic exhibits, scientific and popular articles, books, and documentaries presenting the impacts of climate change in the mountain world (Figure 11). Yet the replication of his thousands of photographs of glaciers and high mountain landscapes in the Andes and Himalayas has only begun, leaving exciting opportunities for future generations of geographers, natural resource managers, and students of mountain geography to pursue their own interests related to contemporary change in the world's high mountain regions. Although the Schneider archives

have now been safely archived in several institutions throughout Europe, the same cannot be said of the many thousands of historic photographs taken by other high mountain climbers, scientists, scholars, and practitioners. Most of these remain in obscure and/or private collections, and are in need of a formal institutional home (e.g., a university, alpine club, or museum), scanning, cataloguing, and indexing, with the alternative being the permanent loss of these priceless resources.



Figure 11. The author in 2012, high over Imja glacial lake in Khumbu, Nepal, following in the footsteps of Erwin Schneider (photograph by S. Rai).

Acknowledgements

My sincere thanks to Hanna Schneider, Curator, Erwin Schneider Archiv, Lech am Arlberg, Austria; Mr. Martin Achraier, Director, Historical Archive Division of the ÖAV, Innsbruck, Austria; Mr. Stefan Ritter, Director, Historic Archives of German Alpine Club, Munich, Germany; and Steve Wegner, Especialista para la Revista Especializada, Dirección de Información y Gestión del Conocimiento, INAIGEM, Huaraz, Peru for their invaluable assistance in providing first-hand and detailed information regarding the life of Erwin Schneider, location of his photographic archives, and accounts of his climbing and cartographic adventures in Nepal, Peru and elsewhere. Special thanks to Professor Jack D. Ives for his support and encouragement, including provision of many of the Schneider and Müller photographs used in Peru and Nepal throughout the years. This paper was written between September 2021 and May 2022 when I served as the Essel and Menakka Bailey Distinguished Fellow of the College of Environment, Wesleyan University, CT, which I thank for its enthusiastic support of my work in all things regarding mountain geography.

References

- Byers, A. C. (1987). An assessment of landscape change in the Khumbu region of Nepal using repeat photography. *Mountain Research and Development* 7(1), 77-81.
- Byers, A.C. (1997). Landscape change in the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Khumbu, Nepal. *Himalayan Research Bulletin* 17(2), 31-41.
- Byers, A. C. (1999). Cambios en el paisaje contemporáneo del Parque Nacional Huascarán y su zona de amortiguamiento, Cordillera Blanca, Perú. Instituto de Montaña, Programa Andino, Serie Documentos de Trabajo 99-1. Huaraz, Peru.
- 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.
- Byers, A. C. (2003). Landscape change in the Sagarmatha National Park, Nepal. In Sherpa, A. R. and Höivik, S. (Eds.), *Triumph on Everest: A tribute from the Sherpas of Nepal*, 91-100. Kathmandu, Mandala Book Point.
- Byers, A. C. (2005). Contemporary human impacts on alpine ecosystems in the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Khumbu, Nepal. *Annals of the American Association of Geographers*, 95(1), 112-140.
- Byers, A. C. (2008). An assessment of contemporary glacier fluctuations in Nepal's Khumbu Himal using repeat photography. *Himalayan Journal of Sciences* 4(6), 21- 26.
- Byers, A. C. (2010a). Fifty years of climate, culture, and landscape change in the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Nepal. *Education about Asia* 15(3), 9-14.
- Byers, A. C. (2010b). Photography journey: Taking the long view at Mount Everest. In Salina, I. (Ed.), *Written in water Messages of hope for Earth's most precious resource*, 107-119. Washington, D.C., National Geographic Society.
- Byers, A.C. (2016). The changing glaciers of the Everest region. ECS-Nepal, Issue 124 (May). <http://ecs.com.np/features/the-changing-glaciers-of-the-everest-region>
- Byers, A.C. (2017a). A qualitative assessment of contemporary glacier loss in the Cordillera Blanca, Peru, using repeat photography. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña* 2 (2017): 31-40.
- Byers, A. C. (2017b). *Khumbu since 1950: Cultural, landscape and climate change in the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Khumbu, Nepal*. Kathmandu, ECS Publications.
- Byers, A. C. 2021. The greening of the Khumbu. *Nepali Times*, 16 January, 2021. <https://www.nepalitimes.com/banner/the-greening-of-the-khumbu/>
- Byers, A. and Kolff, A. (1997). Contemporary landscape change in the Huascarán National Park, Peru: Replication of three 1936 scenes from the Oesterreichischer Alpenverein (Innsbruck) Photographic Archives. Report. Franklin, West Virginia, The Mountain Institute, Spruce Knob Mountain Research Center.
- Carey, M., Garrard, R., Cecale, C., Buytaert, W., Huggel, C. and Vuille, M. (2016). Climbing for science and ice: From Hans Kinzl and mountaineering-glaciology to citizen science in the Cordillera Blanca. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1, 59-72.

- Eckholm, E. P. (1975). *Losing ground: Environmental stress and world food prospects*. New York: W.W. Norton & Company.
- Harden, C. and Byers, A. C. (2022). Anthropogenic geomorphic change in mountains. In Shroder, J. F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, Vol. 9, Geomorphology of Human Disturbance, Climate Change, and Hazards, 240-262. Elsevier.
- Hoerlin, B. (2011). *Steps of courage: My parents' journey from Nazi Germany to America*. Bloomington, Indiana, AuthorHouse.
- Hoffman, W. (1987). Preface (a tribute to Erwin Schneider). *Mountain Research and Development*, 7(4), High Mountain Cartography: Hochgebirgskartographie, 345-346.
- Hunt, J. (1954). *The conquest of Everest*. London, E. P. Dutton.
- ICIMOD. (2009). *Captured on camera: 50 years of climate change in the Himalayas*. Photographic exhibit.
- Ives, J. D. (1986). *Glacial lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya: A review of the Langmoche disaster, Khumbu Himal, 4 August 1985*. ICIMOD Occasional Paper, 5. Kathmandu, ICIMOD.
- Ives, J. D. and Messerli, B. (1989). *The Himalayan dilemma: Reconciling development and conservation*. London, Routledge.
- Jiduc, S. G. (2016). Contemporary landscape changes in the Cordillera Blanca and Cordillera Huayhuash of Peru (1936-2012). *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 1(1), 37-50.
- Kinzl, H. (1940). Las tres expediciones del "Deutscher Alpenverein" a las cordilleras peruanas. *Boletín del Museo de Historia Natural "Javier Prado"*, 4(12), 3-24.
- Kinzl, H. and Schneider, E. (1950). *Cordillera Blanca (Perú)*. Innsbruck, Universitäts-Verlag Wagner.
- Schneider E. (1963). Foreword to the map of the Mount Everest region. In Hagen, T., Dyhrenfurth, G.-O., von Fürer-Haimendorf, C. and Schneider, E. (Eds), *Mount Everest: Formation, population and exploration of the Everest region, 182-195*. London, Oxford University Press.
- Smythe, F. (1930). *The Kangchenjunga adventure: The 1930 expedition to the third highest mountain in the world*. London, V. Gollancz Ltd.
- Taragon Museum. (2016). Erwin Schneider. <http://taragonmuseum.com/contributor/erwin-schneider/>
- Vuichard, D. and Zimmerman, M. (1986). The Langmoche flash-flood, Khumbu Himal, Nepal. *Mountain Research and Development* 6(1): 90-94.

Geomorphological Imprints of Major Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs): First Insights from Peru-wide GLOF Inventory

Huellas Geomorfológicas de los Aluviones de Lagunas Glaciares (GLOF): Primeros Conocimientos del Inventario GLOF del Perú

Adam Emmer¹

¹ *Institute of Geography and Regional Science, University of Graz, Austria*

Abstract

Glacial lake outburst floods (GLOFs) are considered one of the most effective geomorphological agents in deglaciating high mountain regions across the world. Building on the further analysis of unprecedentedly detailed, recently prepared Peru-wide inventory of GLOFs (Emmer et al., 2022a), this study aims at characterizing geomorphological imprints of major Peruvian GLOFs. Illustrative examples of erosional processes, sediment transport and depositional processes as well as the quantification of the reach of the GLOF process chains and hazard implications of GLOF-induced landslides are outlined. Two spatial clusters of geomorphologically effective GLOFs are found: the first one in Northern Peru (Cordillera Blanca – Cordillera Huayhuash) and the second in Southern Peru (Cordillera Vilcabamba – Cordillera Urubamba), both experiencing severe landforming GLOFs in the past. Presence / absence of selected geomorphological imprints of 62 moderate to extreme Peruvian GLOFs are summarized, revealing common presence of distinct outwash fans (77.4%) and breached moraine dams (61.3%). Material entrainment further downstream happened in 38.7% of cases while post-GLOF landslides seem rare (observed in 9.7% of cases). Data show that geomorphologically effective reach of Peruvian GLOFs rarely exceed 5 km (16.1% cases) while the mean slope of the trajectory is typically between 5° and 14° (interquartile range). Understanding geomorphological imprints and geomorphological processes associated with GLOFs is an important step in better GLOF hazard and risk identification and management as well as required information for enhanced GLOF modelling.

Keywords: *Lake outburst floods, GLOFs, Cordillera Blanca, Andes*

Resumen

Los aluviones por desborde repentino o por la rotura de los diques de lagunas glaciares (GLOF, por sus siglas en inglés) se consideran uno de los agentes geomorfológicos más efectivos para desglaciar regiones de alta montaña en todo el mundo. Sobre la base del análisis adicional del inventario de GLOFs de todo el Perú recientemente preparado y detallado sin precedentes (Emmer et al., 2022a), este estudio tiene como objetivo caracterizar las huellas geomorfológicas de los principales GLOFs peruanos. Se describen ejemplos ilustrativos de procesos de erosión, transporte de sedimentos y procesos de depósito, así como la cuantificación del alcance de las cadenas de procesos GLOF y las implicaciones de peligro de los deslizamientos de tierra inducidos por GLOF. Se encuentran dos grupos espaciales de GLOF geomorfológicamente efectivos: el primero en el norte de Perú (Cordillera Blanca – Cordillera Huayhuash) y el segundo en el sur de Perú (Cordillera Vilcabamba – Cordillera Urubamba), ambos experimentando GLOFs severos en el pasado. Se resume la presencia/ ausencia de huellas geomorfológicas seleccionadas de 62 GLOFs peruanos de moderados a extremos, que revelan la presencia común de distintos abanicos aluviales (77.4 %) y presas de morrena rotas (61.3 %). El arrastre de material aguas abajo ocurrió en el 38.7% de los casos, mientras que los deslizamientos de tierra posteriores a GLOF parecen raros (observados en el 9.7% de los casos). Los datos muestran que el alcance geomorfológicamente efectivo de los GLOF peruanos rara vez supera los 5 km (16.1% de los casos), mientras que la pendiente media de la trayectoria suele estar entre 5° y 14° (rango intercuartílico). Comprender las huellas geomorfológicas y los procesos geomorfológicos asociados con los GLOFs es un paso importante para una mejor identificación y gestión de peligros y riesgos de GLOF, así como la información necesaria para mejorar el modelado de GLOFs.

Keywords: *Aluviones, GLOFs, Cordillera Blanca, Andes*

1. Introduction

The magnitude, flood volume and peak discharge of sudden releases of water retained in glacial lake (glacial lake outburst floods, GLOFs) may be an order of magnitude larger compared to hydro-meteorologically-induced floods (Costa and Schuster, 1988). As such, major GLOFs are characterized by extreme erosion and transport potential (Clague and Evans, 2000). The ability of erosion and entrainment, transformation into the flow-type movement and subsequent deposition of transported material far from the source areas make GLOFs effective geomorphological agents, which shape the mountain landscapes across the globe (O'Connor et al., 2001; Iribarren Anacona et al., 2015; Nie et al., 2018; Carrivick and Tweed, 2019).

A number of published GLOF studies from all over the world focus on assessment of GLOF susceptibility or modelling of potential future GLOFs from GLOF-susceptible lakes (see the overview of Emmer, 2018; Emmer et al., 2022b). However, some of these studies suffer from being detached from in-depth analysis and characterization of past GLOFs in studied regions. From this perspective, understanding erosion-deposition interactions, amplification and attenuation within the GLOF process chains and geomorphologically effective GLOF reach (distance, slope of the trajectory) can provide valuable inputs for hazard and risk assessment of potential future GLOFs.

The recent study of Emmer et al. (2022a) showed that the Peruvian Andes (and especially certain parts of it, e.g., the Cordillera Blanca) experienced a number of

GLOFs in the past (here referring to the period since the Little Ice Age lasting from 1590 to 1720 (first phase), and from 1780 to 1880 (second phase); Thompson et al., 2000; Solomina et al., 2007). While numerous studies on individual GLOFs (e.g., Kinzl, 1940; Broggi, 1942; Oppenheim, 1946; Ghiglini and Spann, 1951; Torres and Brottgger, 1951; Hubbard et al., 2005; Carey et al., 2012; Vilímek et al., 2015; Mergili et al., 2018; Vilca et al., 2021) as well as sub-regional to regional GLOF inventories (Kinzl and Schneider, 1950; Lliboutry et al., 1977; Portocarrero, 1984; Zapata Luyo, 2002; UGRH, 2013; Emmer, 2017; Bat'ka et al., 2020; Emmer et al., 2022a) exist across Peru, no comprehensive overview of geomorphological imprints of Peruvian GLOFs has been presented so far. To bridge this gap, this study aims to provide an overview of geomorphological processes and landforms associated with past GLOFs in Peruvian Andes. Ultimately, better understanding of geomorphological imprints of past GLOFs can, in turn, help to predict and alleviate potentially adverse impacts of future GLOFs.

2. Methods and Data

2.1. Peru-wide GLOF Inventory

Preparation of comprehensive GLOF inventories usually integrates several sources of information: (i) documentary data sources, (ii) analysis of remote sensing imageries, and (iii) field evidence (e.g., Emmer, 2017; Nie et al., 2018; Veh et al., 2019; Zheng et al., 2021). This is also the case of Emmer et al. (2022a) GLOF inventory covering the Tropical Andes of Peru and Bolivia. From

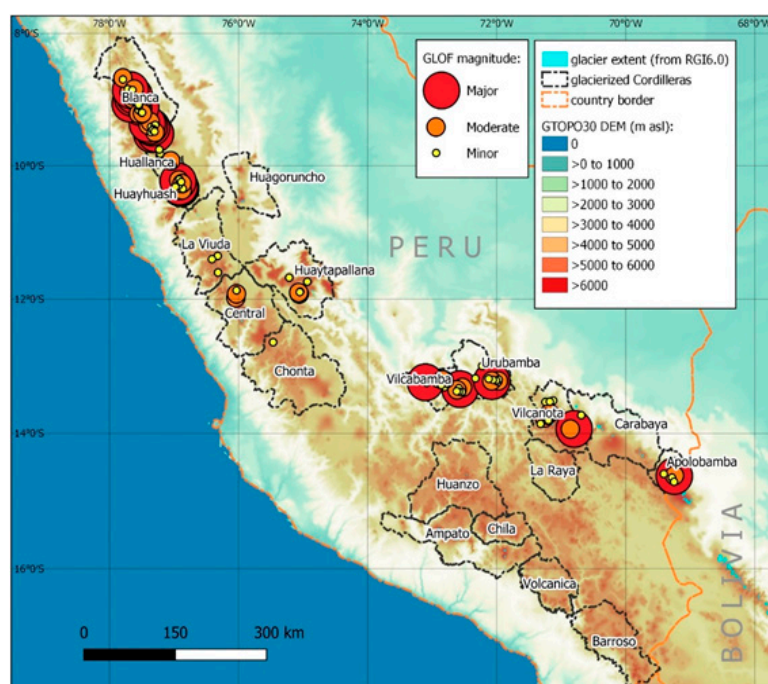


Figure 1. A map of inventoried GLOFs throughout Peru. Major, moderate and minor events are distinguished (data on GLOF location and magnitude from Emmer et al., 2022a).

the 160 inventoried GLOFs (many of which were not documented previously), 139 GLOFs (from 131 lakes) occurred in Peru (Figure 1). Three GLOF magnitudes are qualitatively distinguished for Peru in this article: (i) major GLOFs (22 cases), (ii) moderate GLOFs (40 cases), and (iii) minor GLOFs (77 cases). Only moderate to extreme GLOFs (62 events) which are characterized by substantial geomorphological imprints are further analyzed in this work (see also Emmer, 2023). These occurred in the following cordilleras: Blanca (34 cases), Huallanca (1 case), Huayhuash (8 cases), Central (2 cases), Huaytapallanta (2 cases), Vilcabama (6 cases), Urubamba (3 cases), Vilcanota (4 cases) and Apolobamba (2 cases). The disproportionally high concentration of GLOF cases in the Cordillera Blanca might be associated with it having the largest amount of available documentary data (Emmer, 2017).

2.2. Characterization of GLOF-associated Processes and Landforms

2.2.1. Data

Multi-temporal CNES / Airbus / Maxar Technologies satellite images with sub-metric resolution, available from Google Earth Pro (v. 7.3.4.8248 (64-bit)), were used for analysis of geomorphological features and landforms associated with GLOFs. These images cover the entire study area with at least one scene for each location. Most of the studied GLOF sites are covered by images acquired in 2019, 2020 or 2021 with a few exceptions of older images. Quantitative characteristics (distances and areas) were derived manually from Google Satellite images connected through XYZ Tiles (<http://www.google.cn/>

[maps/vt?lyrs=s@189&gl=cn&x={x}&y={y}&z={z}](https://maps.vt?lyrs=s@189&gl=cn&x={x}&y={y}&z={z})) into the QGIS 3.10 A Coruña environment (www.qgis.org). Apart from satellite images, three sets of old aerial photographic images (1948-1950, 1960 and 1970) from the archive of the Autoridad Nacional del Agua (ANA) in Huaraz were used to characterize less recent GLOFs. These data are, however, only available for the Cordillera Blanca.

A digital elevation model (DEM) available in the Google Earth Pro was used to manually measure the elevation of the GLOF-producing lakes and the elevation of the GLOF attenuation zone (the most distal zone where geomorphological imprints of GLOF are recognizable) in order to derive basic information about the reach of GLOF process chains (see section 3.4). The reach of the GLOF is measured as streamline length between the lake and the attenuation zone (in km). Furthermore, the slope of the trajectory (reach in degrees) is calculated as the inverse sine function of a difference of elevation between the lake and the attenuation zone related to the streamline length between these (Figure 2).

Besides the analysis of remote sensing imagery and DEMs, selected GLOF sites have been visited in the cordilleras Blanca and Huayhuash between 2012 and 2019 (nine months of fieldwork in total). Fieldwork included reconnaissance, photo documentation and detailed topographical measurements aiming at the quantification of erosion-transport-deposition processes and landforms. Breached moraine dams have been measured in order to quantify the amount of eroded material (see section 3.1), while dimensions of the largest transported boulders were measured in order to document transport capacity of GLOFs (see section 3.2).

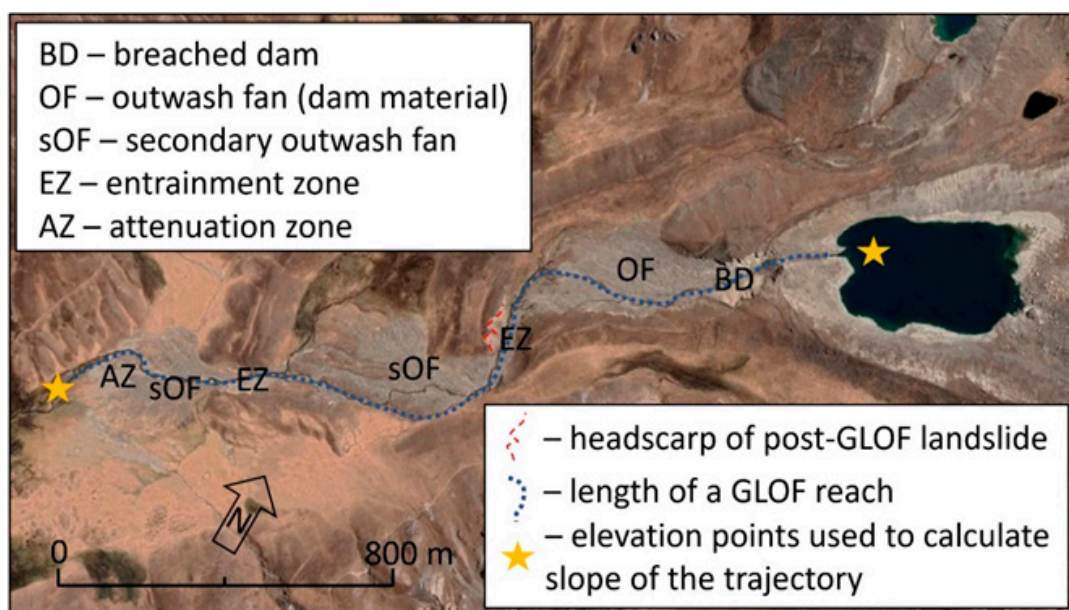


Figure 2. Described / measured characteristics of analyzed GLOFs – an example of Lake Chuspicocha in the Cordillera Huaytapallanta (GLOF ID B_020). Individual geomorphological imprints as well as methodology of reach measurements are shown. Image: CNES / Airbus image taken on August 2, 2019, available from Google Earth Pro.

2.2.2. Geomorphological Imprints of Peruvian GLOFs

By integrating the above mentioned data sources, geomorphological imprints of 62 studied GLOFs are characterized with regard to (i) the presence / absence of a breached dam (clearly incised / eroded dam); (ii) the presence / absence of an outwash fan (fan-shaped deposition located downstream of a GLOF-producing lake); (iii) the presence / absence of entrainment further downstream (deep or bank erosion further downstream in the valley, not considering the breach of the dam); (iv) reach of the GLOF in km (distance between the lake to the farthest evidence of geomorphological imprints); (v) slope of the trajectory between the GLOF-producing lake and the attenuation zone in degrees; and (vi) post-GLOF landslides (slope deformation of undercut slopes).

Illustrative examples of these imprints as well as measured characteristics are shown in Figure 2.

3. Results and Discussion

The presence or absence of geomorphological imprints associated with major Peruvian GLOFs are presented in Table 1. Following sub-sections elaborate on described geomorphological imprints in detail. Section 3.1 deals with erosional processes and landforms, section 3.2 provides information on sediment transport, section 3.3 focuses on deposition of transported material, section 3.4 gives an overview of traceable GLOF reaches and section 3.5 focuses on GLOF-induced landslides and other phenomena.

Table 1. Geomorphological imprints of major Peruvian GLOFs. GLOF ID and GLOF location are from Emmer et al. (2022a).

GLOF and GLOF location				Geomorphological imprints					
GLOF ID	LONG	LAT	Cordillera	Breached dam	Outwash fan	Entrainment down in the valley	Reach (km)	Slope of the trajectory (°)	GLOF-induced landslides
A_001	-69.249	-14.631	Apolobamba	Y	Y	Y	1.67	8.3	N
A_002	-70.801	-13.934	Vilcanota	Y	Y	Y	7.32	3.5	N
A_003	-73.105	-13.24	Vilcabamba	Y	N	Y	2.54	9.6	N
A_004	-76.897	-10.336	Huayhuash	Y	Y	?	?	?	?
A_005	-76.906	-10.318	Huayhuash	Y	Y	Y	?	?	?
A_006	-76.914	-10.312	Huayhuash	Y	Y	?	?	?	?
A_006_2	-76.914	-10.312	Huayhuash	?	?	?	?	?	?
A_007	-76.937	-10.233	Huayhuash	Y	Y	?	?	?	?
A_008	-77.343	-9.523	Blanca	Y	Y	Y	?	?	?
A_009	-77.286	-9.515	Blanca	Y	Y	Y	17.5	4.9	?
A_010	-77.344	-9.421	Blanca	Y	Y	?	1.51	4.8	?
A_010_2	-77.344	-9.421	Blanca	Y	Y	?	?	?	?
A_011	-77.381	-9.398	Blanca	Y	Y	Y	241	1.1	Y
A_011_2	-77.381	-9.398	Blanca	N	N	N	17.7	3.9	?
A_012	-77.414	-9.365	Blanca	Y	Y	N	1.23	13.7	N
A_012_2	-77.414	-9.365	Blanca	N	N	N	?	?	?
A_013	-77.515	-9.114	Blanca	Y	Y	?	?	?	?
A_014	-77.681	-9.063	Blanca	Y	Y	Y	12.8	7.7	?
A_015	-77.644	-8.975	Blanca	Y	Y	N	1.53	5.6	N
A_015_2	-77.644	-8.975	Blanca	Y	Y	N	1.53	4.6	N
A_016	-77.618	-8.938	Blanca	N	N	Y	22.1	4.5	Y

A_017	-77.674	-8.858	Blanca	Y	Y	Y	151	1.6	?
A_018	-72.569	-13.342	Vilcabamba	N	N	Y	51.7	3.7	Y
A_021	-72.077	-13.223	Urubamba	Y	Y	Y	11.2	8.4	N
B_008	-69.245	-14.623	Apolobamba	N	Y	N	1.27	12.8	N
B_010	-70.86	-13.936	Vilcanota	N	N	Y	1.7	9.5	N
B_011	-71.183	-13.701	Vilcanota	Y	Y	N	0.65	13.3	N
B_012	-71.261	-13.77	Vilcanota	?	Y	N	1.49	3.8	N
B_013	-71.973	-13.22	Urubamba	Y	Y	N	1.81	16.1	N
B_014	-72.531	-13.318	Vilcabamba	N	N	Y	1.65	28	N
B_015	-72.615	-13.353	Vilcabamba	Y	Y	Y	1.89	9.9	N
B_017	-72.819	-13.206	Vilcabamba	Y	Y	N	2.13	12	N
B_018	-72.841	-13.204	Vilcabamba	N	N	Y	0.59	21.3	N
B_019	-75.06	-11.923	Huaytapallanta	Y	Y	N	1	8.2	N
B_020	-75.069	-11.902	Huaytapallanta	Y	Y	Y	2.12	4.7	Y
B_021	-76.043	-11.98	Central	Y	Y	N	0.8	3.2	N
B_022	-76.874	-10.364	Huayhuash	N	N	Y	2.56	6	N
B_023	-76.928	-10.213	Huayhuash	Y	Y	N	0.65	7.6	N
B_024	-76.877	-10.267	Huayhuash	Y	Y	N	0.69	4.7	N
B_025	-77.051	-9.924	Huallanca	Y	Y	N	1.28	6.2	N
B_026	-77.296	-9.494	Blanca	Y	Y	N	2.13	8.7	?
B_027	-77.401	-9.385	Blanca	N	N	Y	1.72	17.8	N
B_028	-77.368	-9.338	Blanca	N	Y	Y	1.4	15.1	N
B_029	-77.503	-9.219	Blanca	?	Y	N	3	10.4	N
B_030	-77.512	-9.166	Blanca	Y	Y	N	1.53	14.4	N
B_031	-77.506	-9.142	Blanca	N	Y	N	0.8	15.9	N
B_032	-77.484	-9.134	Blanca	?	Y	N	0.7	11.5	N
B_033	-77.513	-9.123	Blanca	Y	Y	N	1.68	14.7	Y
B_034	-77.556	-9.068	Blanca	Y	Y	N	1.61	13.2	N
B_035	-77.594	-9.03	Blanca	?	Y	Y	1.11	14.9	N
B_036	-77.645	-8.991	Blanca	Y	Y	N	1.15	9.4	N
B_037	-77.646	-8.939	Blanca	N	Y	N	1.48	25.3	N
B_038	-77.615	-8.933	Blanca	Y	Y	N	1.45	12.5	?
B_039	-77.693	-8.881	Blanca	N	Y	Y	3.9	9.1	Y
B_040	-77.794	-8.674	Blanca	Y	Y	N	1.3	20.5	N
B_041	-77.619	-8.842	Blanca	N	N	N	0.5	12.1	N
B_041_2	-77.619	-8.842	Blanca	N	Y	N	0.5	16.6	N
B_042	-77.551	-9.213	Blanca	N	Y	N	?	?	?

B_042_2	-77.551	-9.213	Blanca	N	N	Y	13.1	7.9	?
B_043	-77.491	-9.207	Blanca	N	N	N	4.59	7.8	N
B_045	-72.077	-13.219	Urubamba	Y	Y	N	2.33	20.2	N
B_046	-76.032	-11.922	Central	Y	Y	Y	2.45	4.4	N

Y – presence of this landform / feature; N – absence of this landform / feature; ? – not clear from the data / data not available.

3.1. Erosional processes and landforms

In general, two distinct mechanisms of water release from a glacial lake can be distinguished: (i) dam overtopping (water release over the dam without permanent decrease of the lake water level), and (ii) dam failure (water release through incised / breached / internally eroded dam with permanent decrease of the lake water level). While dam overtopping is typically associated with minor magnitudes and marginal geomorphological imprints (but possibly originates from any glacial lake subtype), dam failures are exclusively associated with moraine-dammed lakes in the Peruvian Andes and frequently result in substantial geomorphological imprints (75% of major Peruvian GLOFs originated from moraine-dammed lakes).

The primary source of eroded material in the case of dam failures is a damming moraine, typically formed by unconsolidated, poorly sorted material (Figure 3A). A breached moraine dam was present in 38 out of 62 cases of major Peruvian GLOFs (see Table 1). Breaches of up to tens of meters deep and hundreds of meters long were incised through moraine dams and were a source of material for further transport and subsequent deposition. The approximately 150 m high moraine dam of Lake Jancarurish (Cordillera Blanca) was breached in 1950, resulting in the erosion and entrainment of approximately 0.4-0.6 10⁶ m³ of moraine material (Figures 3B and C), which was transported and deposited further downstream in the Los Cedros Valley.

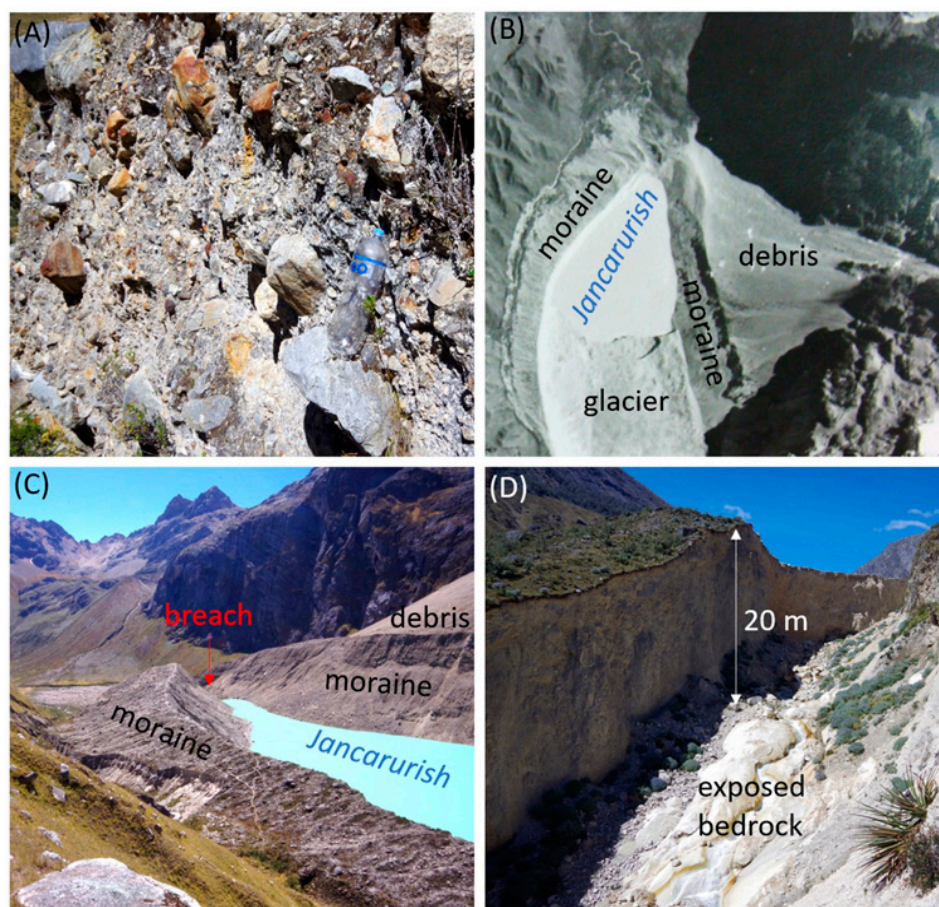


Figure 3. Examples of erosional processes and landforms associated with Peruvian GLOFs. (A) shows a detail of internal structure of the breached moraine dam of Lake Solteracocha (Cordillera Huayhuash), which failed in 1932 (note the 2.5 l bottle used for scale); (B) shows Lake Jancarurish (Cordillera Blanca) in 1948, i.e., before the moraine dam failure and GLOF of 1950 (Image: ANA archive, Huaraz); (C) shows the breached moraine dam of Lake Jancarurish in 2016; and (D) shows a section eroded to bedrock of the Santa Cruz Valley affected by the 2012 multi-lake outburst flood originating from Lake Artizón Alto. Field images: A. Emmer.

Further erosion (deep or lateral) typically occurs along the steeper parts of the longitudinal profile where previously deposited material of glacial, glaciofluvial, fluvial or slope origin is located. Table 1 reveals that 24 GLOFs encountered entrainment further downstream. For instance, the 1941 catastrophic GLOF from Lake Palcacocha (Cordillera Blanca) was seen to erode a gorge up to 50 m deep through old moraines in the areas where the Cojup stream leaves the gently sloped, U-shaped mountain valley and the longitudinal profile gets steeper. Major GLOFs are capable of eroding this sediment cover down to the bedrock floor of a valley. The 2012 GLOF process chain in the Artizón and Santa Cruz valleys (Cordillera Blanca) eroded old moraine and colluvium deposits and exposed basal bedrock in several sections (Figure 3D).

3.2. Sediment Transport

Volume of transported (solid) material is site-specific and, apart from GLOF characteristics (peak discharge, stream power), strongly depends on the amount of entrainable material along the GLOF path. Erosional landforms, such as breached moraine dams and entrainment zones (see section 3.1), as well as depositional landforms could be used for estimating the volume of eroded / transported / deposited material. However, these volume estimates are often limited by the lack of pre-GLOF terrain models and possibly

missing depositions of fine-grained particles. Several detailed case studies showed that the total volume of transported material was on the order of 10^6 m³ in the most extreme GLOF cases in the Peruvian Andes (e.g., Mergili et al., 2020).

Direct observation of GLOF transport is rare, especially if it happens in remote, high mountain areas. As such, transport potential of GLOFs is often deduced from deposited boulders (see also section 3.3), despite the fact that the original position and travel distance cannot be reconstructed in many cases. However, this approach does not account for the possible absence of transportable boulders and may result in underestimation of the stream power. On the other hand, the largest boulders found may have been transported by a GLOF, but only exposed by it. Therefore, deposited boulders should be interpreted with care. The largest boulders transported by Peruvian GLOFs reached diameters of several meters (Figure 4A). The outwash fan of the 1941 Palcacocha GLOF contains large boulders up to 8 m in diameter which were likely eroded and transported from the breached moraine dam (distance about 500 m). The largest boulders forming the outwash fan associated with the 1950 Jancarurish GLOF (see also Figure 3) are up to 5 m in diameter and located circa 300 m from the breached moraine dam. The largest boulders transported by GLOFs usually do not exceed 2 m in diameter.

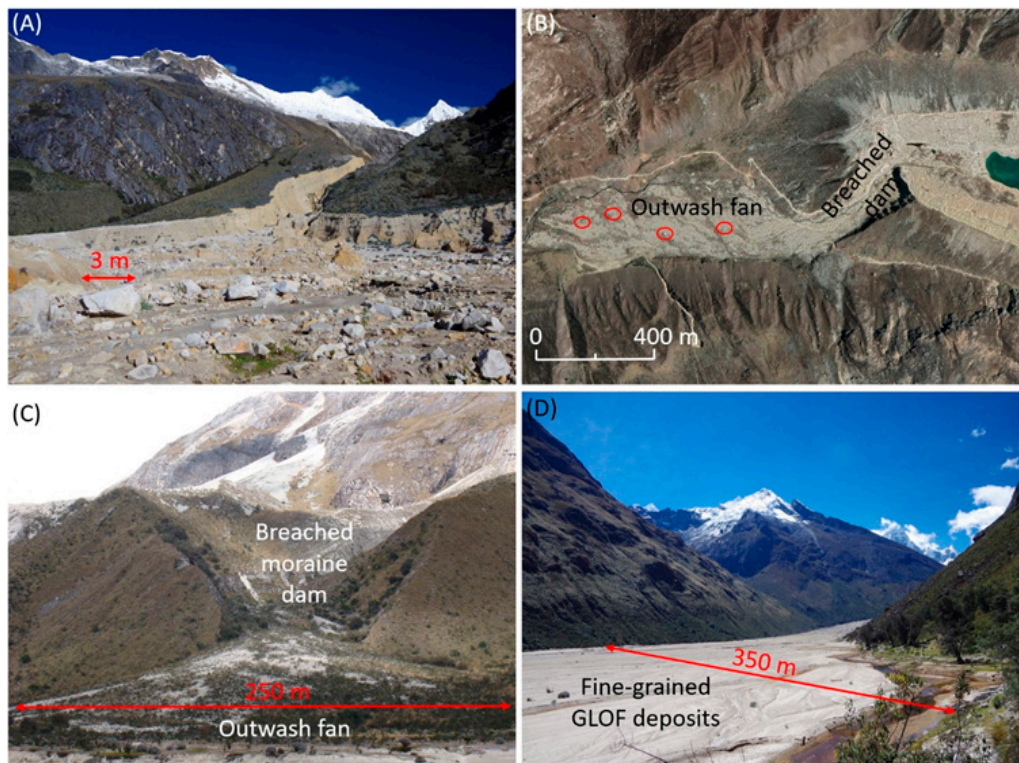


Figure 4. Examples of GLOF deposits. (A) shows individual boulders deposited by the 2012 multi-lake outburst flood in the Artizón / Santa Cruz valleys; (B) shows the location of extremely large boulders (red circles) eroded and transported from the dam of Lake Palcacocha during the 1941 GLOF (image: CNES / Airbus image taken on July 3, 2020, available from Google Earth Pro); (C) shows an example of an outwash fan associated with the 1945 outburst flood in the Parón valley; and (D) shows fine-grained GLOF deposits in the Santa Cruz Valley from the 2012 event. All examples are from the Cordillera Blanca. Field images: AE.

3.3. Depositional Processes and Landforms

The deposition of eroded and transported material is observed in the reach of the longitudinal profile where the slope gets less steep (e.g., Mergili et al., 2018). As such, the first GLOF deposit is typically located directly downstream from the lake dam where large boulders are concentrated, forming a suspicious outwash fan – one of the diagnostic features of past GLOFs (see also Emmer, 2017; Figures 4B and 4C). Outwash fans of post-LIA Peruvian GLOFs are up to several hundred meters wide and up to one kilometer long. However, an outwash fan does not need to be present in the case where the GLOF mechanism is dam overtopping, and the possible GLOF origin of an outwash fan needs to be interpreted with care. Outwash fan-like landforms may also be located further down the valley along the GLOF path, typically downstream of the entrainment zones (secondary outwash fans, see Figure 2). The piedmont areas of Peruvian cordilleras are frequently characterized by massive fans formed by deposits of material transported from the mountain valleys on a long-term gradual and short-term episodic basis. Some of these might have been associated with extremely large palaeo-GLOFs. This assumption, however, remains speculation due to the lack of data.

GLOF deposits along the longitudinal valley profile are characterized by a maximum particle size largely controlled by the mean slope of the valley floor. The 2012 multi-lake outburst flood in the Artizón / Santa Cruz valleys (Cordillera Blanca) exhibited a clear deposition pattern. While larger boulders (up to 1 m in diameter) were deposited in the part of the valley where the mean slope is between 4° and 7° (near the confluence between the Artizón and Santa Cruz streams), cobbles and pebbles with diameters up to 15 cm in diameter were deposited in the part of the valley where the mean slope is between 2° and 4°, while sand and gravel-sized particles (up to 2 cm in diameter) were deposited where the valley slope is less than 2° (Figure 4D; see also Mergili et al., 2018; Emmer, 2021).

3.4 The Reach of Geomorphologically Effective GLOF Imprints

The reach of a GLOF process chain depends primarily on the topographical setting (longitudinal profile) of the GLOF-affected stream, where flat areas act as natural attenuation zones. However, several other factors may influence the course of GLOF and associated geomorphological imprints. One of them is the availability of entrainable sediment – if no entrainable sediment is present, geomorphological imprints of a GLOF will be suppressed (e.g., no geomorphological imprints are observed over bare bedrock surfaces). On the other hand, a GLOF may be amplified to a high magnitude event if entrainable material is present. Lakes located downstream of GLOFs have an ambiguous role in the propagation of geomorphological GLOF imprints. They may attenuate further GLOF propagation if they have sufficient retention capacity and the energy of an incoming GLOF is dissipated

within the lake (e.g., attenuation of the GLOF process chain in the Artizón / Santa Cruz valleys; see Mergili et al., 2018). However, a downstream lake may also amplify impacts of a GLOF in the case where the lake's dam fails and, thus, increases the overall flood volume. This was the case with the 1941 Palcacocha GLOF, which caused the failure of downstream Lake Jircacocha, substantially increasing water volume and overall event magnitude (Mergili et al., 2020). Therefore, understanding the position of the lake in the periglacial system is necessary (Emmer et al., 2020; Wood et al., 2021).

The reach of a GLOF has been estimated for 52 events for which aerial and satellite images / documentary data were available and allowed the tracking of geomorphological GLOF imprints. It is found that most of the Peruvian GLOFs (33 cases) have a geomorphologically effective reach of 1 to 5 km from the source lake, while nine events have geomorphological imprints traceable less than 1 km from the source lake (Figure 5). It is important to note that some of these cases are examples of GLOFs attenuating in lakes located downstream. The remaining 10 GLOFs resulted in geomorphological imprints traceable >5 km from the source lake, of which two reached >100 km and are considered extreme magnitude events (the 1941 Lake Palcacocha and the 1950 Lake Jancarurish GLOFs, both in the Cordillera Blanca; see also Emmer, 2017).

In terms of the slope of the trajectory (in degrees), its value varies from ~1° in case of the most extreme, far reaching GLOFs to ~28°. Half of the GLOFs (interquartile range), however, have a slope of the trajectory between 5° and 14°, while the median slope of the trajectory is ~9°. No clear difference is observed among the reaches of GLOFs associated with dam failures and GLOFs associated with dam overtoppings (Figure 5). However, the two most far-reaching cases were both associated with moraine dam failures.

3.5. GLOF-induced Landslides and Other Phenomena

Extreme GLOFs which cause deep and lateral erosion and undercut steep slopes surrounding GLOF-affected streams may also precondition the initiation of post-GLOF sliding activity. These can occur on the inner slopes of breached moraine dams or further downstream in the valley. It is important to understand the occurrence of GLOF-induced landslides because (i) landslides can cause subsequent damming of the stream, and (ii) landslides may damage property and assets located far from the GLOF-affected areas (i.e., in presumably GLOF-safe areas). The 2020 GLOF from Lake Salcantaycocha (Cordillera Vilcabamba; see also Vilca et al., 2021) triggered a number of landslides along the affected stream, some of which exceeded 10,000 m² in size (Figure 6). The GLOF-induced landslide which slid from the undercut left bank interrupted the road connecting Collapampa and Chaullay and also destroyed an electricity pylon (both located far from the reach of the GLOF itself).

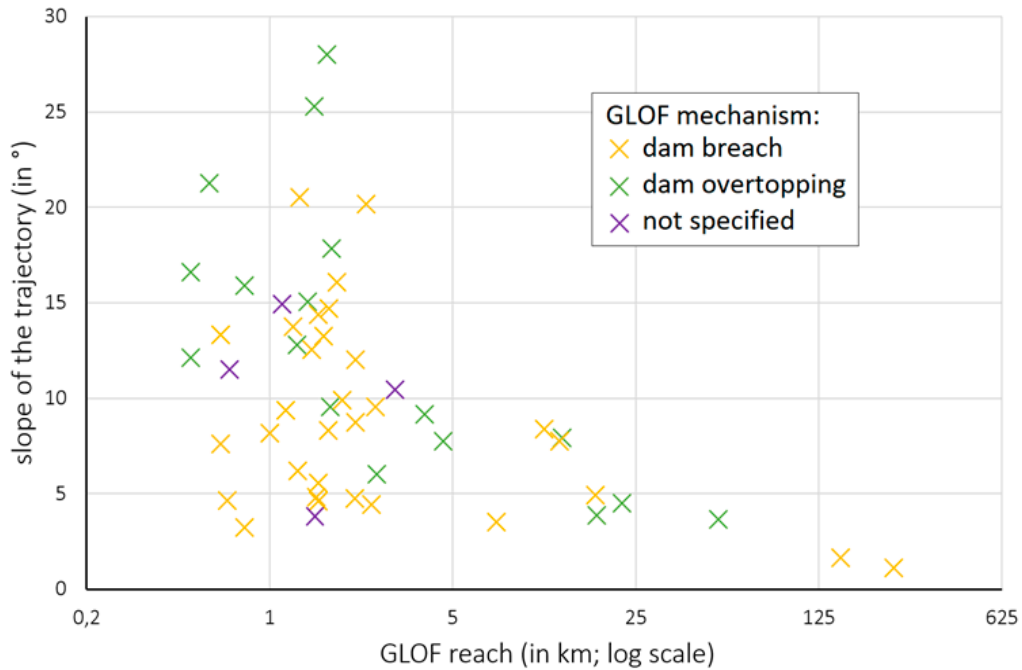


Figure 5. The reach of Peruvian GLOFs. The reach in km is plotted against the slope of the trajectory for two distinct GLOF mechanisms (dam failure and dam overtopping). Original data are presented in Table 1.

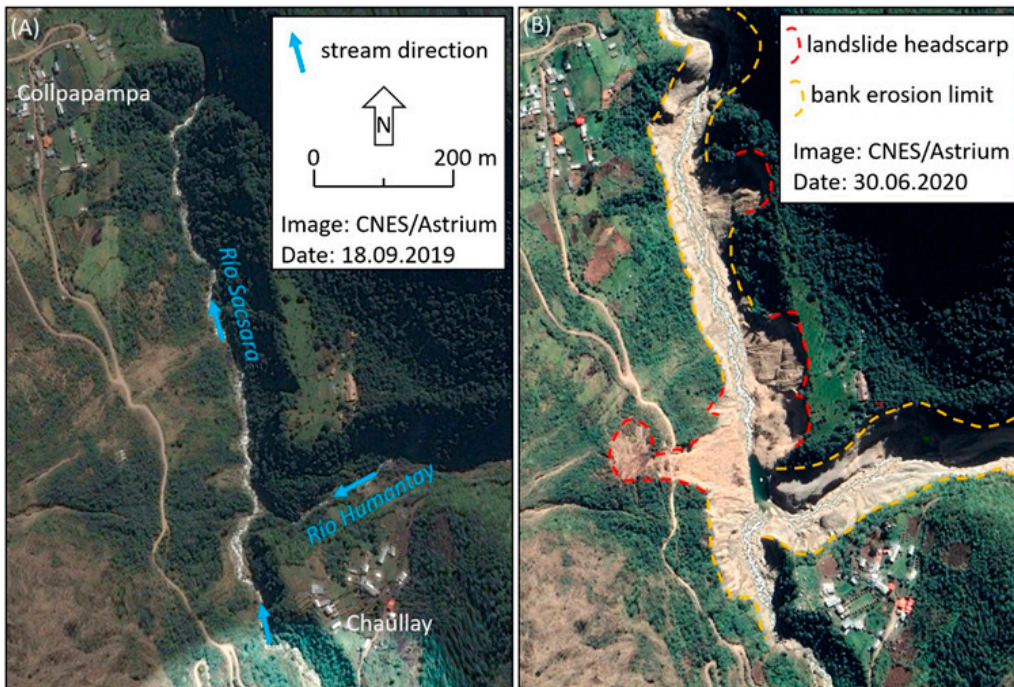


Figure 6. The confluence of the Río Humantay with the Río Sacsara (Apurímac) before (A) and after (B) the 2020 GLOF from Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba). The area shown is located 12 km downstream from the source lake. GLOF-induced landslides and heavily eroded banks of the stream, as well as small lake formed in the depression eroded at the confluence, are visible in the post-event part. Images: CNES / Airbus images taken on September 18, 2019 (A) and on June 30, 2020 (B), available from Google Earth Pro.

4. Conclusions and Recommendations for Future Work

This study illustrates geomorphological effectiveness and imprints of major GLOFs throughout the Peruvian Andes, building on the recently updated country-wide GLOF inventory. It is shown that GLOFs are capable of mobilizing millions of cubic meters of material and substantially redefining geomorphology of affected areas. Geomorphological imprints of GLOFs were traced kilometers from source lakes, with the overall slope of the trajectory $< 5^\circ$ in the case of far-reaching GLOFs, highlighting the need for the anticipation of possibly destructive GLOF impacts far from the source. This study is the first step in defining and quantifying landforms and erosion-transport-deposition processes associated with GLOFs in the Peruvian cordilleras. Clearly, the ultimate objective of this work is data-driven GLOF hazard assessment, modelling and risk reduction, taking into account erosion-transport-deposition interactions of GLOF process chains.

In conclusion, the following future work is recommended:

- Discontinue focusing on downstream impacts only. While a better understanding of GLOF triggers is of the utmost importance for GLOF hazard assessments (see the overviews of Emmer and Vilímek, 2013; Kougkoulos et al., 2018), data quantifying these are rare (e.g., volume, dynamics and mechanics of triggering landslides or ice avalanches). Emmer et al. (2022a) have shown that the majority of GLOFs in the tropical Andes were triggered by various types of rapid mass movements into the lakes (debris flows, landslides from moraines, rockfalls and rockslides, ice- and ice-rock avalanches). GLOF susceptibility and hazard assessment studies are recommended to achieve less uncertain quantification of possible GLOF triggers.
- Disentangle amplification and attenuation elements in GLOF cascades. The site-specific, complex nature of GLOF occurrence and propagation allows various external factors to act in highly non-linear ways and change the magnitude (as well as the geomorphological imprints and possible societal impacts) substantially (e.g., Vilca et al., 2021). As such, a holistic approach to identify these 'escalation points' within a GLOF hazard cascade is recommended.
- Going beyond focusing on 'just' GLOFs. It is important to note that secondary (subsequent) geomorphological processes induced by and/or associated with GLOFs (e.g., GLOF-induced landslides) should not be overlooked when mapping GLOF hazard zones and designing and planning GLOF mitigation measures, because areas, property and assets located far from the reach of the GLOF itself may be affected.

Acknowledgement:

The author is a member of the RCUK-CONICYT Glacial Lakes of Peru (GLOP) project and further acknowledges financial support from the Charles University in Prague (for field surveys of 2012-2017) and Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences (for field surveys of 2018-2019).

References:

- Bat'ka, J., Vilímek, V., Štefanová, E., Cook, S. J. and Emmer, A. (2020). Glacial lake outburst floods (GLOFs) in the Cordillera Huayhuash, Peru: Historic events and current susceptibility. *Water*, 12(10), 2664.
- Broggi, J. A. (1942). *Informe preliminar sobre la exploración y estudio de las condiciones de estabilidad de las lagunas de la Cordillera Blanca*. Lima, ELECTROPERU.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haerberli, W. (2012). An integrated socioenvironmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 112(3-4), 733-767.
- Carrivick, J. L. and Tweed, F. S. (2019). A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective. *Earth-Science Reviews*, 196, 102876.
- Clague, J. J. and Evans, S. G. (2000). A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19(17-18), 1763-1783.
- Costa, J. E. and Schuster, R. L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100(7), 1054-1068.
- Emmer, A. (2017). Geomorphologically effective floods from moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 177, 220-234.
- Emmer, A. (2018). GLOFs in the WOS: Bibliometrics, geographies and global trends of research on glacial lake outburst floods (Web of Science, 1979-2016). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 813-827.
- Emmer, A. (2021). Mapping glacial lake outburst flood landforms for enhanced understanding of their occurrence. *Geograz*, 68, 26-29.
- Emmer, A. (2023). Vanishing evidence? On the longevity of GLOF diagnostic features in the Tropical Andes. *Geomorphology*, 422, 108552.
- Emmer, A. and Vilímek, V. (2013). Review article: Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: An example from the Cordillera Blanca (Peru). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(6), 1551-1565.
- Emmer, A., Harrison, S., Mergili, M., Allen, S., Frey, H. and Huggel, C. (2020). 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 365, 107178.

- Emmer, A., Wood, J. L., Cook, S. J., Harrison, S., Wilson, R., Diaz-Moreno, A., Reynolds, J. M., Torres, J. C., Yarleque, C., Mergili, M., Jara, H. W., Bennett, G., Caballero, A., Glasser, N. F., Melgarejo, E., Riveros, C., Shannon, S., Turpo, E., Tinoco, T., . . . Poma, C. (2022a). 160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 208, 103722.
- Emmer, A., Allen, S. K., Carey, M., Frey, H., Huggel, C., Korup, O., Mergili, M., Sattar, A., Veh, G., Chen, T. Y., Cook, S. J., Correas-Gonzalez, M., Das, S., Diaz Moreno, A., Drenkhan, F., Fischer, M., Immerzeel, W. W., Izagirre, E., Joshi, R. C., . . . Ide, J. C. (2022b). Progress and challenges in glacial lake outburst flood research (2017-2020): A research community perspective. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(9), 3041-3061.
- Ghigliano, L. and Spann, H. (1951). *Ruptura de la laguna Artesoncocha*. Huaraz (Peru), Corporación Peruana del Santa.
- Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J. M., Quincey, D., Richardson, S. D., Zapata Luyo, M., Santillán Portilla, N. and Hambrey, M. J. (2005). Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(10), 1251-1264.
- Iribarren Anaconda, P., Mackintosh, A. and Norton, K. P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: Lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 2-21.
- Kinzl, H. (1940). 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. and Schneider, E. (1950). *Cordillera Blanca (Perú)*. Innsbruck (Austria), Universitäts-Verlag Wagner.
- Kougkoulos, I., Cook, S. J., Jomelli, V., Clarke, L., Symeonakis, E., Dortch, J. M., Edwards, L. A. and Merad, M. (2018). Use of multi-criteria decision analysis to identify potentially dangerous glacial lakes. *Science of the Total Environment*, 621, 1453-1466.
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A. and Schneider, B. (1977). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, 18(79), 239-254.
- Mergili, M., Emmer, A., Juřicová, A., Cochachin, A., Fischer, J.-T., Huggel, C., Pudasaini, S. P. (2018). How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1373-1389.
- Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J.-T., Cochachin, A. and Frey, H. (2020). Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 93-114.
- Nie, Y., Liu, Q., Wang, J., Zhang, Y., Sheng, Y. and Liu, S. (2018). An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis. *Geomorphology*, 308, 91-106.
- O'Connor, J. E., Hardison, J. H. and Costa, J. E. (2001). *Debris flows from failures of neoglacial-age moraine dams in the Three Sisters and Mount Jefferson Wilderness areas, Oregon*. Professional Paper 1606. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey.
- Oppenheim, V. (1946). Sobre las lagunas de Huaraz. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 19, 68-80.
- Portocarrero, C. R. (1984). *Seminario - Desastres naturales y geología: Causas, efectos y prevenciones*. Huaraz (Peru), Unidad de Glaciología y Seguridad de Lagunas, ELECTROPERU.
- Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B. and Pouyaud, B. (2007). Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: "Little Ice Age" moraine chronology. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 225-235.
- Thompson, L., Mosley-Thompson, E. and Henderson, K. A. (2000). Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the last glacial maximum. *Journal of Quaternary Science*, 15(4), 107-115.
- Torres, E. and Brottger, A. (1951). *Estudio del segundo aluvión de Artesoncocha*. Ministerio de Fomento. Huaraz (Peru), Comisión de Control de las Lagunas de la Cordillera Blanca (CCLCB).
- UGRH. (2013). Registro histórico de aluviones y avalanchas en el departamento de Ancash. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Huaraz (Peru), Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH).
- Veh, G., Korup, O., von Specht, S., Roessner, S. and Walz, A. (2019). Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya. *Nature Climate Change*, 9, 379-383.
- Vilca, O., Mergili, M., Emmer, A., Frey, H. and Huggel, C. (2021). The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru). *Landslides*, 18, 2211-2223.
- Vilímek, V., Klimeš, J., Emmer, A. and Benešová, M. (2015). Geomorphologic impacts of the glacial lake outburst flood from Lake No. 513 (Peru). *Environmental Earth Sciences*, 73(9), 5233-5244.
- Wood, J. L., Harrison, S., Wilson, R., Emmer, A., Yarleque, C., Glasser, N. F., Torres, J. C., Caballero, A., Araujo, J., Bennett, G. L., Diaz-Moreno, A., Garay, D., Jara, H., Poma, C., Reynolds, J. M., Riveros, C. A., Romero, E., Shannon, S., Tinoco, T., Turpo, E. and Villafane, H. (2021). Contemporary glacial lakes in the Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 204, 103574.
- Zapata Luyo, M. (2002). La dinámica glaciaria en lagunas de la Cordillera Blanca. *Acta Montana*, Series A, 19(123), 37-60.
- Zheng, G., Bao, A., Allen, S., Ballesteros-Canovas, J. A., Yuan, Y., Jiapaer, G. and Stoffel, M. (2021). Numerous unreported glacial lake outburst floods in the Third Pole revealed by high-resolution satellite data and geomorphological evidence. *Science Bulletin*, 66, 1270-1273.

Entre el Estado, la Comunidad y el Abuelo: Agua y Justicia Climática en el Sur del Callejón de Huaylas

Between the State, the Community and the Grandfather: Water and Climate Justice in the South of the Callejón de Huaylas

Mattias Borg Rasmussen¹

¹ *Departamento de Economías de Recursos y Alimentos, Universidad de Copenhague, Dinamarca*

Resumen

Los cambios climáticos representan ya una realidad vivida y experimentada en la sierra peruana. Las cumbres nevadas con sus glaciares que parecían eternos se han convertido en íconos del calentamiento global y quienes viven en su entorno se han convertido en pioneros de la transformación fundamental de los regímenes, los flujos y la escasez del vital elemento. Sin embargo, las poblaciones de los Andes no han producido las emisiones causantes de los cambios. Además, si bien los cambios climáticos en su raíz son productos de procesos físicos de la atmósfera, sus efectos son filtrados y mediados a través de arreglos institucionales y sus legados históricos. El presente artículo es una reflexión en torno a la justicia hídrica en la sierra ancashina. Tomando como eje analítico las dimensiones de la justicia social de la distribución y el procedimiento, narro la confluencia de dos procesos entrelazados: por un lado, los cambios climáticos y cómo se enraízan en los territorios de las comunidades campesinas, y, por otro, los cambios institucionales para controlar el flujo del agua. Muestro cómo el control del agua se encuentra contentiousamente compartido entre autoridades tradicionales relacionadas con la cosmovisión andina (el abuelo), las autoridades locales actuales (la comunidad y la junta), y los gobiernos y sus instituciones (el Estado). Más allá de sus cualidades biofísicas, la justicia hídrica en tiempos de cambios climáticos muestra que sus efectos engloban un problema de desigualdad, pobreza y democracia.

Palabras clave: *Justicia hídrica, Andes, cambio climático, comunidades campesinas*

Abstract

Climate changes already represent a lived and experienced reality in the Peruvian highlands. The snowy peaks with their seemingly eternal glaciers have become icons of global warming, and those who live around them have become pioneers of the fundamental transformation of regimes, flows and scarcity of the vital element. However, the populations of the Andes have not produced the emissions that cause the changes. Furthermore, although climate changes are at their root products of physical processes in the atmosphere, their effects are filtered and mediated through institutional arrangements and their historical legacies. This article is a reflection on water justice in the Sierra Ancashina. Taking as analytical axis the dimensions of social justice of distribution and procedure, I narrate the confluence of two intertwined processes: on the one hand, climate changes and how they take root in the territories of peasant communities, and, on the other, the institutional changes to control the flow of water. I show how the control of water is contentiously shared between traditional authorities related to the Andean worldview (the grandfather), current local authorities (the community and the board), and governments and their institutions (the State). Beyond its biophysical qualities, water justice in times of climate change shows that its effects encompass a problem of inequality, poverty and democracy.

Keywords: *Water justice, Andes, climate change, peasant communities*

Introducción

“¡No hay agua!”. Don Diosdado, comunero de la Comunidad Campesina Los Andes de Recuay, se ha puesto de pie como es costumbre cuando uno toma la palabra durante la Asamblea General. El asunto es serio. Llega poca agua a su manada y falta agua para los animales, la familia y los pastos. Don Diosdado pasa mucho tiempo en las alturas de la puna. “Antes, no era así”, dice. Hablamos de las lluvias erráticas y los glaciares que cada año van yéndose más para arriba. Ese no es el único problema, por más grande que sea. Porque aún hay bastante agua en el río que abastece el canal de riego. “El problema es que otra gente está sacando agua”. El problema es quién controla el flujo del agua (Rasmussen, 2015).

La Cordillera Blanca es famosa por sus cumbres nevadas. La cadena tropical con la mayor extensión glaciar en el mundo, la Cordillera Blanca, se ha convertido en un ícono del cambio climático global y sus efectos nefastos para las poblaciones locales (Carey et al., 2017). Los efectos del cambio climático son perceptibles sin instrumentos científicos: en los diez años que han pasado desde aquella reunión en la que don Diosdado lamentaba su situación hídrica, he podido seguir los avances de los cambios y las estrategias de las poblaciones inmediatas en la parte sur de la cuenca del río Santa. Después de un tiempo en el campo, hay dos observaciones que, en su núcleo, no son muy difíciles de comprender: primero, que el cambio climático es una realidad ya vivida y experimentada. Y que la escasez y los excesos que se relacionan con los cambios climáticos no se pueden entender fuera de su contexto social, político y económico (Ribot, 2013, 2014).

Este ensayo es una reflexión en torno a la justicia hídrica en la sierra ancashina. Basado en trabajos publicados (Carey et al., 2017; Rasmussen 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020; Rasmussen, French, y Conlon, 2019), propongo un análisis transversal de la lucha por el agua y la justicia social que enmarca su distribución equitativa y transparente. Como voy a desarrollar con más detalle a continuación, tomo como punto de partida para el análisis las dimensiones de justicia de la *distribución* y el *“procedimiento”* (Fraser 2000, 2009; Agyeman et al., 2016). Voy a explicar cómo se vive con las nuevas presencias y ausencias del agua – de su distribución – y cómo diferentes arreglos institucionales en diferentes escalas intentan determinar sus flujos – a través de procedimientos. Enfocándome en los *regímenes de agua*, entendidos estos como las fuerzas políticas y ambientales que rigen, mueven, desvían y almacenan el agua, pregunto cuáles son las capacidades que tienen las comunidades para controlar y abastecerse del agua.

Conuerdo con Damonte-Valencia (2015) en argumentar que, si bien los cambios climáticos son dramáticos, la escasez y los excesos del agua son fundamentalmente problemas socioambientales. Narro aquí la confluencia entre cómo se enraízan los cambios climáticos en los territorios de las comunidades

campesinas, y, por otro lado, los cambios institucionales para controlar el flujo del agua. Muestro cómo el control del agua se encuentra contenciosamente compartido entre las autoridades tradicionales relacionadas con la cosmovisión andina (el abuelo), las autoridades locales actuales (la comunidad y la junta) y los gobiernos y sus instituciones (el Estado). Más allá de sus cualidades biofísicas, la justicia hídrica en tiempos de cambios climáticos muestra que sus efectos engloban un problema de desigualdad, pobreza, y democracia.

Metodología

Este ensayo está basado en mi trabajo con comunidades campesinas en la provincia de Recuay. Empecé con un año de trabajo de campo en las cercanías de Recuay en 2010-11. Luego, he tenido la posibilidad de volver a la zona en múltiples ocasiones, enfocándome más en la Comunidad Campesina de Cátac. Con visitas en 2014, 2015, 2016, 2017 y 2019 se fueron acumulando otros 10 meses de trabajo de campo. Los métodos incluyen observación participante, entrevistas semiestructuradas, un censo poblacional y del agua en las comunidades de Recuay en 2010 y una encuesta con 27% de la población de la Comunidad de Cátac en 2019. Aquí no voy a presentar material nuevo, pero es la primera vez que se presenta en castellano, brindando una lectura transversal sobre los hallazgos en el marco de la justicia hídrica.

Justicia Hídrica

La justicia hídrica es un campo de investigación específico bajo el marco más amplio de la justicia ambiental. Como justicia ambiental, la justicia hídrica se preocupa por el “cómo” y el “por qué” de la distribución inequitativa de los beneficios y daños en cuestiones ambientales, con un enfoque particular en el agua. Por lo tanto, la justicia hídrica se conecta con la literatura sobre la gobernanza histórica del agua de la zona andina, y se diferencia de esta por su normatividad explícita. Su punto de partida es la pregunta por el acceso al agua limpia y útil, y los arreglos institucionales que gobiernan su distribución. Como bien lo explican Boelens, Vos y Perreault (2018), la distribución de derechos de acceso al agua y los procesos de toma de decisiones relacionados con el agua son bastante desiguales.

En trabajos anteriores (Rasmussen, 2015) propuse el concepto de *regímenes de agua* para describir las fuerzas entrelazadas, ambientales y políticas, que rigen el flujo del agua. El concepto nació de la confluencia de dos usos de la palabra régimen. Por un lado, los hidroecólogos la utilizan para describir los procesos biofísicos del movimiento del agua, y por otro, en el campo de las relaciones internacionales se ha utilizado el mismo concepto para describir las regulaciones y legislaciones que rigen los cuerpos de agua internacionales. Aquí hago trabajo conceptual para juntar estas dos escalas: los regímenes de agua son aquellas confluencias entre los arreglos institucionales y los usuarios de múltiples escalas que buscan controlar un flujo ya definido por sus propiedades biofísicas.

La justicia hídrica surgió como campo de investigación dentro de la justicia ambiental justamente por sus cualidades particulares: es un líquido con flujo natural; es la base para toda la vida del planeta; y su flujo está sujeto a arreglos institucionales (Orlove y Caton, 2010). El agua es el elemento central de las relaciones sociales de producción y reproducción. En este contexto, lo hidrosocial ha surgido como vocabulario para captar la hibridad del agua. Ni únicamente social ni únicamente natural, el agua y su distribución solamente existen a través de la simultaneidad de los dos. Es posible que haya agua físicamente fuera de las relaciones sociales, como la lluvia o el acuífero, pero siempre es mediada por imaginarios, infraestructuras, prácticas, creencias y sistemas de conocimiento. Que el agua como recurso natural esté entrelazado con relaciones sociales es un entendimiento más antiguo que el concepto de lo hidrosocial. Para David Harvey (1974), el recurso no existe en lo abstracto, en sí mismo. El recurso siempre es recurso en su relación con un sistema de usos y valoraciones.

Comparto las expresiones de Boelens, Vos y Perreault (2018: 2) de que necesitamos herramientas teóricas conceptuales para reconocer y desafiar las injusticias hídricas, identificando así el poder y las políticas del uso, manejos y gobernanza del agua. Mi acercamiento a la justicia ambiental se basa en el trabajo de Nancy Fraser (2000, 2009). En sus intervenciones iniciales, Fraser estaba interesada en la relación entre la distribución – los fundamentos de la filosofía sobre la justicia social, como se puede apreciar claramente en el trabajo de Rawls (2020 [1971]) – y el reconocimiento. Iluminando los desafíos del dilema redistribución-reconocimiento, Fraser mostró que la injusticia presenta múltiples dimensiones y que intentos de remediar injusticias en la economía política (distribución) a menudo podrían ocasionar injusticias en el estatus social (reconocimiento). En la última década, los trabajos sobre justicia se ven particularmente interesados en una tercera dimensión, la justicia procedural (Schlosberg, 2009; Ottinger, 2013) o la justicia de la representación (Fraser, 2009). Para Nancy Fraser, solamente se llega a la justicia social a través de la paridad de la participación. La habilidad para participar completamente en los procesos de deliberación y toma de decisiones se convierte en la medidora fundamental de la justicia.

Entonces, propongo aquí que, para entender las dinámicas de la justicia hídrica en el contexto de cambios climáticos, debemos enfocarnos en la tensión entre la mal-distribución del agua y la mis-representación política. Esto implica dos maniobras analíticas centrales. Por un lado, debemos entender la mala distribución como un fenómeno hidrosocial producido por una constelación del régimen del agua. Si bien los efectos de los cambios climáticos están creando nuevos patrones, incluso en las lluvias, los acuíferos subterráneos y el derretimiento de los glaciares, estos flujos del agua se rigen por arreglos institucionales. Por otro lado, hay competencias entre instituciones que operan a diferentes escalas. Estas incluyen no solamente quién puede tomar qué tipo de decisión, sino también sobre los límites de lo político y,

por ende, qué puede formar parte de los procesos de la toma de decisiones.

Distribución: Escasez y Exceso del Agua como Problema Biofísico, Histórico y Político

Volvemos entonces a la reunión en la puna y los reclamos de don Diosdado. Su difícil situación es el producto de varios problemas y procesos que operan e interactúan a diferentes escalas. Aquí voy a mostrar cómo la mala distribución del agua en el caso de don Diosdado tiene sus raíces en historicidades y escalas múltiples: la escasez es un fenómeno que no se puede reducir a sus partes. Quiero pensar con don Diosdado, pero el análisis va más allá de su exclamación que “*el agua es vida*” de aquel día.

La literatura sobre los efectos de los cambios climáticos en la zona andina ya es extensa, no pretendo dar una reseña completa de sus dimensiones biofísicas y sociales (véase, por ejemplo, Carey et al., 2017). Las observaciones de los comuneros concuerdan en gran medida con la ciencia. Conversaciones informales, entrevistas y trabajos cuantitativos, tanto en 2010 como en 2019, realizados en Recuay y Cátac respectivamente, muestran una preocupación por el clima tal como se expresa en fenómenos meteorológicos como precipitaciones más erráticas con periodos extendidos de sequía, seguidos por episodios de lluvia torrencial, elevada frecuencia de granizadas y heladas, vientos más fuertes, bofedales más secos y temperaturas más extremas.

Estos son eventos climáticos, pero la gente también es sensible ante los efectos más lentos, cuyos cambios se miden en años y décadas. El retroceso glaciar es una fuente de tristeza y preocupación. En el artículo “Futuros de Agua” (Rasmussen, 2016), describí los intentos de un grupo de comuneros de Cátac para crear un reservorio en las alturas de una quebrada. La idea fundamental sería la creación de una estructura que podría remedar el efecto abastecedor del glaciar. La imagen del glaciar como torre de agua natural es común para ilustrar su importancia fundamental en la regulación del flujo anual del agua en los ríos de la Cordillera Blanca (Rasmussen, 2019). Si bien las interacciones entre agua glaciar, lluvias, agua superficial y agua subterránea son más complejas que lo que la imagen de la torre de agua permite apreciar, el retroceso glaciar instala un marco narrativo para comprender los efectos de los cambios climáticos en las poblaciones rurales campesinas. En el fondo, los cambios climáticos en los Andes se expresan por intermedio del agua.

La presencia del agua y la definición de usuarios en la zona rural están condicionadas por procesos históricos. La provincia de Recuay es un área que vive con el legado del régimen de los grandes terratenientes y su mala distribución de la tierra. Las comunidades campesinas que hoy en día representan el principal orden territorial son producto de las luchas por el control de la tierra. Aquí es importante señalar que cada canal de riego tiene su propia historia, la cual está estrechamente ligada a las dinámicas

de la tierra y las pertenencias a estructuras políticas. Ya sea canales antiguos como el que debía abastecer a don Diosdado (Rasmussen, 2015) o proyectos recientes como los descritos en “Futuros de Agua” (Rasmussen, 2016), su creación y la definición de usos y usuarios son históricamente contingentes y relacionados con un orden político territorial y una economía política. La desigualdad histórica en el acceso al agua define también en la actualidad quiénes son usuarios legítimos y quiénes son usurpadores.

Entonces, el problema del agua y su distribución también es un problema político. Históricamente, la distancia entre los que toman decisiones y los que toman el agua en zonas rurales ha sido abismal. El *abandono* como figuración de la política sigue siendo un adjetivo para calificar y criticar a las autoridades estatales que parecen no interesarse por el problema del agua en el campo (Rasmussen, 2017). Decir *aquí nos tienen abandonados*, como pasaba en muchas reuniones sobre el agua, considera la ausencia de autoridades estatales no como negligencia, sino como intencional.

Estas observaciones nos llevan a la dimensión política del agua. Como voy a desarrollar a continuación, decidir cuál es el marco institucional relevante para resolver el problema del agua no es un proceso neutro ni inocente. Volviendo a Fraser (2009), observamos que la justicia hídrica entendida como paridad de participación involucra justamente competencias sobre el marco institucional apropiado y la definición de los sujetos de derecho para remediar la mala distribución. Necesitamos entender cuáles son los arreglos institucionales que permiten o prohíben la participación. En este sentido, según Fraser, la participación ejerce una doble capacidad: en sí, puede ser la clave para resolver la mala distribución del agua; como también es un proceso, un campo de batalla sobre *la definición de los procedimientos* que determinen las reglas básicas de la distribución. Estas incluyen reglas sobre quiénes pueden participar, identificando los límites en la comunidad política, y sobre qué pueden tomar decisiones, identificando el sujeto de lo político.

La escasez y el exceso del agua tienen raíces tanto en lo biofísico, como en lo histórico y lo político. Si bien el agua pasa por infraestructuras naturales como el río, el acuífero y la lluvia, siempre llega entrelazada con arreglos institucionales e imaginarios sociales a las chacras y las casas de la población. Entonces, en esta sección he mostrado cómo debemos pensar en la escasez del agua como la que está viviendo don Diosdado, como fenómeno que trasciende escalas y temporalidades. Se basa en la experiencia histórica de un clima que “ya no es como antes”, que “se ha vuelto loco”, en el cual actores en diferentes escalas – desde sus hogares y comités de las comunidades hasta instituciones estatales como parques nacionales, gobiernos locales y diferentes instancias y programas de apoyo rural – buscan soluciones y sentidos en este nuevo, emergente e in consolidado régimen del agua (Rasmussen, 2018).

Procedimiento: Autoridades del Agua

El agua siempre ha estado sujeta a políticas de ingeniería y conocimiento en la zona andina. Estudios como los de Sherbondy (1998) o Valderrama y Escalante (1988) muestran la continuidad histórica de las infraestructuras hidráulicas, pero también subrayan las contingencias históricas. A continuación, me enfoco en la nueva coyuntura hidrosocial. Voy a mostrar cómo los regímenes del agua se van formando en un contexto donde, por un lado, como se mencionó, la distribución del agua va cambiando (abundancia, exceso, escasez) y, por otro, se van produciendo cambios en las autoridades a diferentes niveles, creando sobre todo una mayor dependencia del Estado (ver también Paerregaard, 2016, 2013).

Un día, acompañé a don Santiago a su manada en la parte alta de la puna. Bajamos de la combi que lleva a la gente al glaciar de Pastoruri y de allí subimos por los *bofedales*. Al llegar al bofedal, don Santiago se pone de rodillas y busca en la mochila sus regalitos para el *Abuelo*. Antes de pasar por estos cuerpos de agua, tan celebrados por los hidrólogos por su capacidad para captarla y purificarla, y lamentados por los conservacionistas debido a las prácticas de los pastores de cavar zanjas, tenemos que pedirles permiso a los seres no humanos que habitan este espacio. Don Santiago arma un paquete con hojas de coca, golosinas y un poco de alcohol y le pide al Abuelo que nos proteja en nuestra caminata a través de los bofedales de las alturas.

El bofedal forma parte de un paisaje cultural en donde el agua es el elemento central. Si bien el hecho de que don Santiago le está pidiendo permiso al Abuelo demuestra que el agua forma parte de un mundo de seres no-humanos; las políticas del agua están arraigadas en una arquitectura institucional más profana. El caso de la laguna Parón en el norte del Callejón de Huaylas descrito por Mark Carey (2010) demuestra una cosmopolítica (en el sentido de Marisol de la Cadena, 2015) similarmente frustrada: por un lado, los actos de remover instrumentos científicos en la laguna por no haberles consultado a los seres no-humanos que habitan dicho espacio muestra que son actos polivalentes con un significado para los comuneros y otro para las instituciones estatales. ¿Es el Abuelo no legible para el estado y sus instituciones? Si bien el Abuelo puede ser una fuerza política en los espacios íntimos, no llega a constituirse como fuerza política más allá de ser denominado como “creencia” en espacios públicos deliberativos sobre el agua. Constituyendo lo que Fricker (2007) llamaría una injusticia epistemológica y Fraser (2009) una injusticia de representación de segundo grado, vemos aquí cómo las políticas del agua van ocupando ciertos espacios políticos definidos por una institucionalidad estatal.

A nivel comunal, el agua está organizada en comités de riego (Rasmussen, 2015) que forman parte de una jerarquía institucional compuesta además por comisiones y juntas regionales y nacionales. Esta organización sociopolítica del agua fue captada por el Estado con la nueva Ley de Aguas de 2009. Cada canal tiene su directiva y sus usuarios. Los

derechos de agua de estos usuarios se rigen en principio por normatividad interna del comité. Así, la definición de turnos de riego y obligaciones de faena es específica para cada grupo de usuarios. Es una organización que, en principio, es independiente de la comunidad campesina, la cual es considerada simplemente como un usuario más. En la práctica, la comunidad como institución vela por los intereses de sus miembros.

Debido al canon minero, hay más recursos para la construcción de nuevos canales de riego. Junto con la reestructuración y, de cierta manera, la profesionalización de las organizaciones de base, significa que el régimen del agua se basa cada vez más en conocimientos científicos y burocráticos. Conceptos como “caudal ecológico” o “aspersión” entran en el vocabulario cotidiano de los usuarios de riego junto con requerimientos de documentación y transparencia. En breve, el campo del agua y sus derechos hídricos están determinados en gran medida por una lógica estatal-científica que define los límites de la política y las modalidades de representación dentro de ella.

Como ha detallado Paerregaard (2013) en el Valle del Colca, hay una transformación de la autoridad del agua desde los *Apus* o *Abuelos* hacia las autoridades y legalidades del Estado. En una encuesta llevada a cabo en 2019 en Cátac, preguntamos por los cambios climáticos y las autoridades y prácticas relevantes. Surgió una pauta clara: son las autoridades estatales quienes son consideradas como el locus para responder a la crisis ambiental. Aquí hay una paradoja ya que, por un lado, la gobernanza local del agua se basa en las lógicas hidrosociales estatales y, por otro, hay una historia de abandono y profunda desconfianza hacia el aparato estatal.

Es en este contexto que la comunidad campesina puede ser un mediador importante (Rasmussen, 2018, 2020), la comunidad de Cátac en particular, producto de décadas de luchas sociales territoriales y transformaciones hacia empresas y emprendimientos comunales. La comunidad campesina andina es una organización basada en una lógica territorial, un conjunto de familias unidas por relaciones de parentesco y pertenencias al lugar. Si bien el agua, formalmente, se rige por las juntas directivas, en la práctica forma parte del ensamblaje de recursos sujeto a la soberanía de recursos percibida de la comunidad: la idea de que la comunidad ejerce la autoridad absoluta sobre los bienes comunes del territorio.

En la comunidad campesina hay una tensión entre la soberanía y la autonomía. Si bien existen ideas sobre la soberanía y su injusticia histórica (Rasmussen, 2018), también se reconoce que la comunidad campesina se inserta en una jerarquía de autoridades estatales. Esta tensión entre la exclusividad territorial de la comunidad y sus interdependencias también se expresa en el campo hidrosocial, en el que se busca movilizar a la comunidad como fuerza política para reclamar derechos de agua y recursos financieros. Por lo tanto, en el contexto de cambios climáticos y transformaciones de las autoridades

hídricas, la comunidad campesina podría surgir como actor clave en la definición del campo político y como institución mediadora de las diversas intervenciones para reconceptualizar el régimen del agua.

A Modo de Conclusión: Justicia Hídrica en los Andes

La justicia hídrica como marco analítico nos orienta la mirada crítica hacia los procesos que producen las inequidades en derechos de agua y el acceso desigual e insuficiente de este recurso vital para sostener la vida. Empezamos el ensayo en la puna de don Diosdado. Aquel día, don Diosdado hizo conexión entre el agua como recurso que depende de procesos biofísicos y el agua como elemento sujeto a políticas multiescalares y multilocales, entrelazado con relaciones de poder y arreglos institucionales. Don Diosdado hizo una crítica fundamental a la *legitimidad* de otros usos y usuarios. Esta legitimidad está condicionada por la constitución de autoridad, pero como he argumentado, la relación va cambiando en la confluencia de cambios climáticos y una estatalización y estandarización de las políticas del agua y sus saberes concomitantes.

En este ensayo he querido señalar dos elementos centrales en la constitución del régimen del agua que configura el territorio hidrosocial de los Andes. Primero, los cambios climáticos son reales, son experiencias ya vividas. Los patrones cambiantes del agua y hielo causan preocupación y ansiedad, creando ya desafíos reales para sostenerse en el campo. Segundo, la mala distribución del agua no se puede comprender fuera de su contexto institucional. Es un argumento que resulta familiar con los análisis de desastre o hambruna desde la ecología política (véase por ejemplo Watts (2013 [1983]) para un ejemplo temprano e icónico). Es relevante para nuestra comprensión de la justicia hídrica y sus desafíos en los Andes peruanos, obligándonos a considerar los arreglos institucionales que contribuyen a la producción de la escasez.

Podemos pensar en la justicia hídrica como una constelación que trasciende escalas espaciales, temporales e institucionales. Por un lado, es cierto que los cambios climáticos son globales, y que tienen sus raíces en la matriz de poder colonial-moderno y sus excesos abrumadores de consumo localizados en el norte global. Los que viven los efectos de estos excesos históricos y actuales han hecho una contribución mínima e insignificante a los procesos que ahora van cambiando patrones hidrológicos fundamentales.

Por otro lado, hemos visto que la distribución del agua se enraza en territorios hidrosociales particulares con sus propias dinámicas, historias y configuraciones políticas. Si entendemos entonces el régimen del agua como una constelación hidrosocial, se precisa un análisis situado de la política del agua. Hemos visto cómo ciertos saberes son marginados y hasta excluidos, creando espacios políticos que en gran medida están definidos dentro de una lógica desarrollista estatal. Esto pasa en un contexto

donde hay más recursos financieros debido al canon minero, y más proyectos de riego entubado y tecnificado. Pero como siempre, se corre el riesgo de producir nuevas desigualdades si no se desarrolla prestando atención a los límites de inclusión de actores y saberes.

Para Fraser (2009), la justicia social es un reto democrático. No puede haber justicia sin la paridad de participación en la toma de decisiones. La cualidad transescalar del régimen del agua representa un desafío para la transformación justa y equitativa de las relaciones políticas que rigen el flujo de este recurso vital. Los desafíos actuales son producto de una historia marcada por jerarquías sociales y sus configuraciones territoriales. Es por eso que, al final, podemos decir que los cambios climáticos y sus injusticias ambientales son problemas de pobreza, desigualdad y deficiencia democrática.

Referencias

- Agyeman, J., Schlosberg, D., Craven, L. y Matthews, C. (2016). Trends and directions in environmental justice: From inequity to everyday life, community, and just sustainabilities. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1), 321-340.
- Boelens, R., Vos, J. y Perreault, T. (2018). Introduction: The multiple challenges and layers of water justice struggles. En Boelens, R., Perreault, T. y Vos, J. (Eds.), *Water justice*, 1-32. Cambridge University Press.
- Carey, M. (2010). *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*: Oxford University Press.
- Carey, M., Molden, O. C., Rasmussen, M. B., Jackson, M., Nolin, A. W. y Mark, B. G. (2017). Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), 350-359.
- Damonte-Valencia, G. H. (2015). Redefiniendo territorios hidrosociales: Control hídrico en el valle de Ica, Perú (1993-2013). *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 12(76), 109-133.
- De la Cadena, M. (2015). *Earth beings: Ecologies of practice across Andean worlds*. Durham, Carolina del Norte, Duke University Press.
- Fraser, N. (2000). Rethinking recognition. *New Left Review*, 3, 107-118.
- Fraser, N. (2009). *Scales of justice: Reimagining political space in a globalizing world*. New Directions in Critical Theory, 31. New York, Columbia University Press.
- Fricker, M. (2007). *Epistemic injustice: Power and the ethics of knowing*. Oxford University Press.
- Harvey, D. (1974). Ideology and population theory. *International Journal of Health Services*, 4(3), 515-537.
- Orlove, B. y Caton, S. C. (2010). Water sustainability: Anthropological approaches and prospects. *Annual Review of Anthropology*, 39(1), 401-415.
- Ottinger, G. (2013). Changing knowledge, local knowledge, and knowledge gaps: STS insights into procedural justice. *Science, Technology, & Human Values*, 38(2), 250-270.
- Paerregaard, K. (2013). Bare rocks and fallen angels: Environmental change, climate perceptions and ritual practice in the Peruvian Andes. *Religions*, 4(2), 290-305.
- Paerregaard, K. (2016). Making sense of climate change: Global impacts, local responses, and anthropogenic dilemmas in the Peruvian Andes. En Crate, S. A. y Nuttall, M. (Eds.), *Anthropology and climate change: From actions to transformations* (2.ª ed.), 250-260. New York, Routledge.
- Rasmussen, M. B. (2015). *Andean waterways: Resource politics in highland Peru*. Seattle, Washington, University of Washington Press.
- Rasmussen, M. B. (2016). Water futures: Contention in the construction of productive infrastructure in the Peruvian highlands. *Anthropologica*, 58(2), 211-226.
- Rasmussen, M. B. (2017). Tactics of the governed: Figures of abandonment in Andean Peru. *Journal of Latin American Studies*, 49(2), 327-353.
- Rasmussen, M. B. (2018). Paper works: Contested resource histories in Peru's Huascarán National Park. *World Development*, 101, 429-440.
- Rasmussen, M. B. (2019). Rewriting conservation landscapes: Protected areas and glacial retreat in the high Andes. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1371-1385.
- Rasmussen, M. B. (2020). Contradictions of community: Capitalist relations in highland Peru. *Canadian Journal of Development Studies / Revue canadienne d'études du développement*, 41(1), 74-91.
- Rasmussen, M. B., French, A. y Conlon, S. (2019). Conservation conjunctures: Contestation and situated consent in Peru's Huascarán National Park. *Conservation & Society*, 17(1), 1-14.
- Rawls, J. 1999 [1971]. *A theory of justice* (Rev. ed.). Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Ribot, J. (2013). Vulnerability does not just fall from the sky: Toward multi-scale pro-poor climate policy. En Redclift, M. R. y Grasso, M. (Eds.), *Handbook on climate change and human security*, 164-199. Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- Ribot, J. (2014). Cause and response: Vulnerability and climate in the Anthropocene. *The Journal of Peasant Studies*, 41(5), 667-705.
- Schlosberg, D. (2009). *Defining environmental justice: Theories, movements, and nature*. Oxford University Press.
- Sherbondy, J. (1998). Andean irrigation in history. En Boelens, R. y Dávila, G. (Eds.), *Searching for equity. Conceptions of justice and equity in peasant irrigation*, 210-214. Assen/Amsterdam, Van Gorcum.
- Valderrama, R. y Escalante, C. (1988). *Del tata Mallku a la mama Pacha. Riego, sociedad y ritos en los Andes peruanos*. Lima, Centro de Estudios y Promoción del Desarrollo.
- Watts, M. J. (2013 [1983]). *Silent violence: Food, famine, and peasantry in northern Nigeria*. Geographies of Justice and Social Transformation, 15. Athens, Georgia, University of Georgia Press.

Percepciones Tradicionales de los Fenómenos Meteorológicos y Prácticas Rituales en la Cordillera Blanca, Ancash (Perú)

Traditional Perceptions of Meteorological Phenomena and Ritual Practices in the Cordillera Blanca, Ancash (Peru)

Doris Walter¹

¹ Investigadora independiente, Estrasburgo, Francia

Resumen

Basándonos en datos etnográficos recogidos en distintas localidades de la Cordillera Blanca, este artículo presenta algunas percepciones tradicionales de los fenómenos meteorológicos. Estos datos vienen a completar un artículo anterior, sobre las percepciones de los cambios climáticos en la misma región. Luego de presentar las diferentes entidades que encarnan los fenómenos meteorológicos, examinaremos cómo los seres humanos pueden interactuar con ellos, sea de manera negativa, generando fenómenos no deseables a través de sus comportamientos, o de manera benéfica, mediante ciertos rituales. Estas investigaciones confirman en gran parte los datos publicados sobre este tema por otros autores en la región, al mismo tiempo que los completan con otros elementos. En fin, se quiere subrayar la gran riqueza de estas creencias y prácticas, reportadas por los habitantes de la cordillera. Con los cambios culturales y sociales actuales, corren el riesgo de caer en el olvido.

Palabras clave: Perú, Cordillera Blanca, fenómenos meteorológicos, percepciones tradicionales, rituales

Abstract

Drawing on ethnographic fieldwork conducted in various rural communities of the Cordillera Blanca, this article focuses on local perceptions of meteorological phenomena. It aims at completing a previous study on perceptions of climate change in the same geographical area. After presenting the different entities that incarnate meteorological phenomena, I explore how human beings can interact with them either negatively, by causing undesired weather events through their behaviour, or beneficially, through various ritual practices. My investigations largely confirm previously published information on this theme in the Cordillera Blanca, while completing it with additional data. This article also underlines the great diversity and cultural value of such local beliefs and practices, which are prone to disappear with the current changes in society.

Keywords: Peru, Cordillera Blanca, meteorological phenomena, traditional perceptions, rituals

Introducción

En este artículo, presentaré algunos datos que he recogido en el transcurso de los años sobre las percepciones de los fenómenos meteorológicos en varias comunidades de la Cordillera Blanca. En los años 90, en el marco de mis investigaciones etnológicas en la región sobre las representaciones de la naturaleza, había empezado a interesarme en este tema, retomándolo en 2014, mientras hacía una investigación sobre las percepciones tradicionales de los cambios climáticos. A pesar del avance de la modernidad, los datos recogidos todavía siguen vigentes en diversos lugares.

Los mitos, leyendas y creencias relacionados con los fenómenos meteorológicos, presentan una gran riqueza y diversidad, y han sido estudiados en muchas regiones de los Andes. En Ancash, varias publicaciones brindan información sobre este tema (Yauri Montero, 1990, 2009; Carranza Romero, 2000). Por otro lado, los estudios etnohistóricos nos permiten entender cómo, después de la Conquista, las tradiciones cristianas se sincretizaron con las creencias autóctonas.¹

Como en todas las poblaciones rurales del mundo, los habitantes de la Cordillera Blanca observan minuciosamente los fenómenos meteorológicos, puesto que influyen directamente sobre sus medios de subsistencia: afectan, entre otros, los sembríos, la crianza de animales y las reservas de agua. Conocen cada tipo de nube, viento, lluvia o arco iris. Muchas veces describen estos acontecimientos como si fueran seres vivientes. Por ejemplo, según la velocidad o la posición que ocupa una nube en el cielo, dicen en quechua: “*Rahu hananchaw pukutay punukuykan*.” “La nube está durmiendo encima del glaciar”. O “*rahu hananchaw pukutay puruykan*.” “La nube está caminando encima del nevado.” Hablan del *ratas byentu* (o “viento harapiento”). Me explicaron que, por lo que recorre las crestas rocosas a gran velocidad, su ropa se destroza y está llena de huecos. Veremos más adelante que la helada, o *qahapu*, también es considerada como una persona.

¹ Véase, entre otros, a Gade (1983), García Escudero (2007) y Plasencia Soto (2015).



Figura 1. Nevado Taulliraju. Foto : M. Masconi.

Como ya lo mencioné, el tema de las percepciones de los fenómenos meteorológicos es bastante amplio y complejo. También es interesante destacar las diferencias que existen de una comunidad a otra, en la misma Cordillera Blanca. En este artículo les daré una breve reseña del tema. Primero, examinaremos algunas de las diferentes entidades que encarnan o controlan los fenómenos meteorológicos, y después, cómo los seres humanos pueden interactuar con ellos.

Las Diferentes Entidades que Encarnan los Fenómenos Meteorológicos

Según las creencias, hay muchas entidades que controlan estos fenómenos.

1) Primero, las montañas (o hirkas) que son sagradas y consideradas como ancestros vivos. Cada una tiene su carácter y sus estados de ánimo. Entre otros fenómenos, las deidades de las montañas regulan las precipitaciones (Figura 1).

Ciertas lagunas o puquiales son considerados como la boca o el ojo de la montaña. Cuando neblinas espesas o nubes negras (llamadas “yana pukutay”) se levantan de las lagunas o de los ríos, traen lluvia. En cambio, cuando las nubes salen de la misma tierra, o sea de las laderas de la montaña, se llaman *patsa pukutay*. No traen lluvia, sino enfermedades, tales como la ranca que malogra los sembríos.

Cuando hacía mis trabajos de campo en los años 90, varios campesinos me explicaron que las montañas de la Cordillera Blanca son “volcanes de agua” (“yaku bulcán”), a diferencia de los “volcanes de fuego” (o “nina bulcán”). En esta percepción del universo, el océano se encuentra debajo de la tierra. En la temporada seca (mayo a setiembre), las aguas se elevan tranquilamente desde el océano hacia el interior de la montaña, alimentando las lagunas, puquiales y glaciares. En cambio, cuando empieza la temporada de

lluvias (octubre a abril), se embravece el océano. Las aguas subterráneas suben o entran en erupción desde el interior de la montaña, y salen a la superficie, causando huaicos o desbordamientos de lagunas (Walter, 2002: 90; 2003: 51) (Figura 2). Además, me contaron que, dentro de algunas montañas, tales como el Huascarán o el Nevado Ishinca, hay una laguna grande, que está allí como hirviendo (Walter, 2002: 83; 2003: 54). Este concepto de “volcán de agua”, que se encuentra también en otras partes de los Andes, ayuda a entender el nexo que existe entre las lagunas y la lluvia. De hecho, cuando una nube aparece encima de una laguna o de un puquial, dicen que es el vapor que sale de la raíz del volcán.²



Figura 2. El volcán de agua. Dibujo: D. Walter.

² Algunas referencias a estos volcanes de la Cordillera Blanca existen en la literatura histórica, folklórica o etnológica (Alba Herrera, 1996: 105; Yauri Montero, 1990: 59; Bode, 1989: 145).

Como lo señala Reinhard (1983: 38), en el tiempo de los Incas, ya se pensaba que la tierra se apoyaba en el mar (Garcilaso, 1961 [1609]: 75) y que las aguas del importante lago Titicaca salían de las aguas del océano bajo la tierra (Earls and Silverblatt, 1978: 304).

2) Aparte de las montañas, los antepasados míticos (o *awkilitos*) se encarnan en las momias que se encuentran en las tumbas prehispánicas o en las cuevas de las alturas. Cuidan a los hombres, dándoles fertilidad mediante las lluvias. Por otro lado, son considerados como los guardianes de las plantas y animales silvestres (Walter, 2002; Walter, 2017a). Actúan sobre la lluvia, la neblina y el granizo.

3) Además, muchos pobladores atribuyen las precipitaciones –o su ausencia– directamente a Dios. Dicen que él decide de todo. Si hay menos lluvia que antes, es un castigo divino, porque hay demasiados pecadores.

4) Los santos cristianos personifican también ciertos fenómenos meteorológicos. Por ejemplo, San Pedro, San Pablo o San Lorenzo manejan algunos vientos. San Pedro, dicen, maneja el viento con su llave.³ También cuentan que siempre hay viento el 29 de junio, en la fiesta de San Pedro y San Pablo, porque los dos apóstoles están peleando. En cuanto al apóstol Santiago, que se ha sincretizado con la poderosa divinidad prehispánica Illapa, es responsable del rayo y del trueno. Cuando estalla una tormenta, cuentan que Santichu⁴ está disparándole al diablo con su escopeta. Si al mismo tiempo caen bolas de granizo, estas aparecen como las balas de su fusil. “Más antes”, me contaron los campesinos, “los diablos andaban por cualquier lugar en las montañas”. En ciertas comunidades, lo personifican

³ Según la Iglesia Católica, San Pedro recibió las llaves del Reino de los Cielos de parte de Jesús Cristo, como signo de su supremacía sobre los demás apóstoles.

⁴ Santichu es el hipocorístico de Santiago [otros variantes son Shanti o Shantichu – Ed.]

directamente al rayo, sin relacionarlo con Santiago.

“Rayush asyaqta illapan.”
“El rayo, dicen, lo dispara al diablo.”

5) Entre varias entidades sobrenaturales, tenemos por ejemplo el arco iris (o *turmanyay*) (Figura 3). Dicen que es un ser maligno, que sale de los puquiales o pantanos, considerados como “mal sitios”. A los malos sitios, les llaman *feyu patsa* o *aksay*, en quechua. Donde hay mal sitio, dicen que “la tierra te va a comer” (“*patsa mikushunki*”). No hay que mirarlo al *turmanyay*, porque es peligroso. Penetra en el cuerpo, especialmente de las mujeres, y se les hincha la barriga.

“Turmanyayta ama allaapa rikaraytsu Ullukuykashunki.”

“No lo mires mucho al arco iris. Se va a introducir (dentro de tu cuerpo).”

Si una mujer embarazada lo mira, el feto se enreda.

“Ama rikaytsu turmanyayta, wambraykitam malogranqa.”

“No mires el *turmanyay*, malogrará a tu hijo.”

Pero el arco iris también puede enfermar a cualquier persona, haciéndole doler todo el cuerpo. Antes de que el mal se empeore, hay que hacer hervir hilos de todos los colores y tomar esta agua. Otro remedio consiste en tostar maíz, trigo, cebada o quinua en la callana, echarle orina, alcohol, agua bendita y sal. Y con esto, sobarse todo el cuerpo.

Cuentan que a veces el arco iris persigue a la gente. Para que se vaya, el secreto consiste en orinar en dirección del arco iris, porque teme a la orina. Pero tiene que ser un varón que lo haga, porque su orina, al salir de su cuerpo, tiene la misma forma que el arco iris.



Figura 3. Arco iris de colores. Foto: F. Rendu.

En algunas comunidades de la Cordillera Blanca, me hablaron del arco iris blanco (*yulaq turmanyay*) y del arco iris negro (*yana turmanyay*). Así, una pastora de la quebrada Alpamayo me contó cómo venía caminando con su hija, rumbo a su choza, después de pastear. En el trayecto, encontraron el *yulaq turmanyay*, que no les dejaba pasar. Pero sus ovejas pasaron. En eso, su hija subió mas arriba, agarró una bosta de vaca (*waaka karka*) y la tiró al *turmanyay*. Con eso, desapareció y allí pasaron. (Es que el *turmanyay* les tiene miedo a los excrementos, tanto como a la orina.) En cuanto al *yana turmanyay*, que aparece de noche, dicen que es muy peligroso y hasta uno puede morir, vomitando y defecando sangre.⁵

Es interesante subrayar que una gran parte de estos datos, proporcionados por mis informantes, son similares a las informaciones recopiladas por los cronistas en la época colonial. De hecho, en el período prehispánico, las poblaciones nativas ya consideraban el arco iris como una potencia sobrenatural maléfica. En cambio, en el Incanato, Arcoiris era una divinidad protectora del Inca (García Escudero, 2007).

En cuanto a la llovizna o *chirapa*, muchas veces está relacionada con el arco iris. Cuando está lloviznando y al mismo tiempo sale el sol, eso trae la enfermedad de la ranca: los cultivos se secan, se vuelven amarillentos y mueren. Y si los pañales de los niños han estado secándose en el aire cuando aparece la *chirapa*, es peligroso: provoca granos en su piel.⁶ Como me avisaron, cuando hay

⁵ Los peligros del arco iris blanco y del arco iris negro aparecen en una leyenda conchucana (Kapsoli, 1993: 146). Otra leyenda, reportada por Julca Guerrero (2017: 57) y llamada *Turmanyay Wamra*, trata del arco iris de colores.

⁶ Si los pañales han sido expuestos al *chirapa*, hay que prender una fogata con eucalipto y excremento de vaca. Y después, pasar los pañales por el humo de esta fogata.

chirapa, mejor es protegerse el cuerpo o refugiarse dentro de una choza.⁷

6) Algunos animales –sean o no sobrenaturales– influyen directamente el clima.

Por ejemplo, entre diciembre y febrero, a veces, una barra de nubes envuelve las altas cumbres de la Cordillera Blanca, mientras que un viento violento, salido de los glaciares, sopla por las quebradas acompañado de ráfagas de lluvia. En las comunidades encima de Huaraz, este fenómeno se llama *atawaray*. Dicen que aparece cuando un tarugo hembra (*Hippocamelus antisensis*, Cervidae) ha parido su cría. En un artículo anterior (Walter, 2017b), he analizado detalladamente el simbolismo de esta creencia.

Por otro lado, me contaron en ciertas quebradas que, cuando un fuerte viento se levanta, es porque un puma (*Puma concolor*, Felidae) en celo está andando por allí.

También hay que mencionarlo al zorro (*Pseudalopex culpaeus*, Canidae). En el mes de febrero o marzo, a veces aparece una nube como un hilo, pegado a las laderas de la montaña. Lo llaman *atuqpa sikyan* o *atuqpa naanin*. Dicen que el zorro está abriendo su acequia o su camino. Es para que llueva (Figuras 4 y 5).

“*Atuq naaninta sutarishqa. Tamyá chaaramunqanam.*”

“El zorro ha jalado su camino. La lluvia ya va a llegar.”

⁷ La enfermedad de lluvia con sol, o *chirapa uncuy*, es mencionada por Felipe Guamán Poma de Ayala en su obra *Nueva crónica y buen gobierno* [1615] (García Escudero, 2007: 5).



Figura 4. Zorro (*Pseudalopex culpaeus*, Canidae). Foto: M. Anger.



Figura 5. *Atuqpa sikyan* (acequia del zorro). Foto: M. Masconi.

7) Si en plena temporada de lluvias, en un cielo cargado de nubes, aparece repentinamente un escampe muy localizado, es porque alguien se ha muerto bocarriba en un río. El escampe se debe al soplo producido por el alma del difunto, al momento de salir del cuerpo. En cambio, si el cuerpo del difunto se encuentra en el río bocabajo, no hay ningún escampe.⁸

Así, vemos que todas estas entidades –que sean divinas, sobrenaturales, o que se trate simplemente de animales o seres humanos– participan en la aparición o el manejo de los fenómenos meteorológicos. Además, algunas plantas y animales (especialmente las aves), tanto como la luna y las estrellas,⁹ tienen un papel importante en las predicciones meteorológicas o como indicadores biológicos. Estos ejemplos muestran cómo en la cultura andina tradicional, todo en la naturaleza está interconectado (Boillat et Berkes, 2013; Varas Castrillo y Valcuende del Río, 2021).

Las Interacciones entre los Fenómenos Meteorológicos y los Seres Humanos

Los seres humanos pueden actuar de manera negativa, causando fenómenos meteorológicos no

⁸ Yauri Montero (2009: 51) reporta una creencia según la cual, cuando llueve demasiado, es por las lágrimas de un cristiano que se ha caído a un río y se muere allí: el muerto llora hasta que alguien lo saque del río.

⁹ Orlove, Chiang y Cane (2004) demostraron que el sistema andino de predicción de las lluvias, mediante observaciones astronómicas sencillas, se asienta sobre una firme base científica.

deseables a través de sus comportamientos, o de manera benéfica mediante distintos rituales.

A) Los Comportamientos Humanos que Causan Fenómenos Meteorológicos No Deseados

Algunos tipos de comportamientos humanos, percibidos como inapropiados por las entidades religiosas o sobrenaturales, tienen repercusiones directas sobre ciertos fenómenos meteorológicos. De hecho, cuando los humanos les faltan al respeto, o actúan en contra de la armonía social, estas entidades les castigan, causando eventos meteorológicos localizados, como sequías anormales, neblinas espesas, lluvias torrenciales o fuertes granizadas.¹⁰ A través de la destrucción de los cultivos, los medios de subsistencia de las poblaciones están afectados.

Aquí están algunos ejemplos.

Un mito, que había recogido en el caserío de Pachma (distrito de Yuracmarca, provincia de Huaylas), ubicado en la parte norte de la Cordillera Blanca, relata cómo, en tiempos antiguos, sus habitantes estaban celebrando su fiesta. Aprovechando esa oportunidad, la divinidad de la montaña cercana se acercó y ofreció mandarles un poco de lluvia. Pero como los habitantes estaban totalmente borrachos, se pusieron a insultar a la divinidad de manera muy grosera. “Que se ponga su agua en el culo”, diciendo. Desde ese entonces, la región de Pachma se ha vuelto medio árida.

¹⁰ Boillat y Berkes (2013) proporcionan datos similares en la región de Cochabamba, Bolivia.

Otros me contaron que, en los años 90, fue el Dios cristiano quien ordenó una fuerte sequía –que duró varios años– en Pampas Grande (una comunidad rural de la Cordillera Negra). El castigo fue por el comportamiento muy presuntuoso de sus habitantes: disfrutando de una abundancia de trigo, lo daban de comer a sus chanchos. Como castigo, les tocó un largo período de hambruna. Es que, según las creencias, el trigo tiene un rango de alto prestigio entre los cereales, y no hay que darlo de comer a los chanchos (Yauri Montero, 2009: 130, 132).

Algunas plantas silvestres de altura pertenecen a los antepasados míticos. Los hombres pueden utilizarlas, pero sin exceso, si no, los awkilitos se enojan y mandan castigos. Por ejemplo, tenemos el caso del *riqrish* (*Werneria nubigena*, Asteraceae), que tiene varios usos medicinales. Sus hojas chancadas sirven para curar las heridas. Si uno recoge esta planta de manera excesiva, el awkilito manda una fuerte lluvia o granizada de manera localizada en las chacras (Walter, 2017a: 158).¹¹ Lo mismo sucede si uno recoge demasiado *waman ripa* (*Senecio tephrosioides*, Asteraceae). Esta planta es un remedio para la tos y los bronquios.

Un campesino de Quitaracsa (pueblo ubicado en el distrito de Yuracmarca) me contó que, con sus hermanos, cuando eran niños, a veces recogían bastantes flores de las alturas, tal como el *hallqa qantu* (*Gentianella weberbaueri*, Gentianaceae), solamente para jugar (Figura 6). Pero cuando llegaban a su casa, su mamá les amonestaba, diciendo que de castigo iba a llover mucho.

¹¹ En Yanama, el *riqrish* se llama ‘cóndor cebolla’. Dicen que es la ensalada de esta ave rapaz. Si los seres humanos la recogen en grandes cantidades, el cóndor se molesta y pide a Dios que mande el granizo.

Inmediatamente, ella llevaba las flores que habían recogido a la iglesia, para pedir perdón.

En las lagunas crece el *kushuru* (*Nostoc* sp., Nostocaceae). Estas pequeñas bolas gelatinosas, clasificadas como cianobacterias, tienen excelentes cualidades nutritivas, y se comen en sopa o ensaladas. Son consideradas como las ‘joyas’ o los ‘collares’ de las lagunas. Así que, si uno recoge demasiadas bolas de *kushuru*, las lagunas mandan su venganza bajo la forma de neblinas espesas. Igual con los fósiles, que son el tesoro de los hirkas.

Cuando una mujer aborta, botando el feto en el campo, y un perro o un chanco se lo come, dicen que va a haber una granizada muy fuerte.¹² En consecuencia, el maíz y la papa están destruidos. Este tipo de granizo es muy localizado. En cambio, si el granizo cae en un sector amplio, no se trata de un castigo. Uno de mis informantes me dio una versión un poco diferente, explicando que después del aborto, el feto enterrado empieza a gritar, pidiendo ayuda. Pero como no ha sido bautizado, el maligno se apodera de él. Entonces, Dios manda el granizo, para aniquilar al maligno.

Entre agosto y octubre, soplan a veces fuertes remolinos de viento, llamados *shukukuy*. Son muy temidos. Aplastan el maíz en las chacras, levantan los techos, y hasta a una persona la pueden levantar. Además, traen cualquier tipo de enfermedad o dan vértigos.¹³ El

¹² Esta creencia es bien conocida en Ancash (Yauri Montero, 1990). Boillat y Berkes (2013) mencionan una creencia similar en Bolivia.

¹³ En quechua, el verbo *shukukuy* quiere decir “contagiar enfermedad” (Carranza Romero, 2003).



Figura 6. *Gentianella weberbaueri* (Gentianaceae). Foto: M. Anger.

shukukuy aparece cuando un hijo ha pegado a su mamá, o cuando hay una pelea fuerte entre compadres y comadres. Me contaron que, en 1995, hubo tal acontecimiento en la fiesta de Coyllur (un centro poblado al este de Huaraz). Por lo cual, el *shukukuy* sopló durante un mes entero. Según me comentaron, normalmente, este viento sopla solamente unos tres a cinco días seguidos. Varias leyendas tratan del origen del *shukukuy*. Una de ellas, recopilada por Carranza Romero (2000: 68), cuenta cómo unos jóvenes maltrataban e insultaban a su madre viuda, pobre y humilde. Una noche, se habían juntado con malos amigos. Al ver que no volvían a casa, su madre salió a buscarlos. Por desgracia, caía una fuerte nevada, la madre se extravió y nunca más apareció. Desde ese entonces, las almas de estos hijos maldecidos van corriendo enloquecidos delante del *shukukuy*. Un mito similar, publicado por Yauri Montero (1990: 96), relata cómo un muchacho ocioso y malcriado había pegado a su madre. Ella se resintió mucho, lloró y lo maldijo. Desde ese momento, el muchacho vaga por el mundo convertido en *shukukuy*. En todas partes, la gente lo odia, lo bota y lo insulta.

A veces, en lugares aislados donde poca gente llega, el *hirka* (o sea la divinidad de la montaña) se molesta por la simple presencia de seres humanos en su territorio. Por ejemplo, si alguien se acerca a una laguna chúcaro (o sea salvaje), puede ser que aparezca repentinamente una densa neblina¹⁴ (Figura 7). A veces sucede lo mismo

cuando los alpinistas escalan ciertas montañas. El *hirka* manda nubes negras o neblinas para que no lleguen a la cumbre (Figura 8). Recuerdo cómo en una fecha, yo había ido a escalar el nevado Artesonraju con un guía huaracino y un porteador de Unchus.¹⁵ El porteador no estaba

¹⁴ Esta creencia es también señalada en Bolivia (Boillat y Berkes, 2013).

¹⁵ Unchus es un centro poblado encima de Huaraz.

acostumbrado a ascensiones técnicas y se lo veía bastante nervioso. Pero la ascensión se presentaba bajo los mejores auspicios: a la hora de salir del campamento, en plena noche, el cielo brillaba con las estrellas. Sin embargo, al llegar a las dos terceras partes de la pared, súbitamente unas nubes envolvieron el nevado, obligándonos a bajar. Lo que hicimos sin pesares, porque la neblina no se levantó en todo el día. Por falta de tiempo, decidimos volver a Huaraz el día siguiente. Pero al momento de irnos, el cielo se despejó y nuestro porteador exclamó que era evidente que el *hirka* había querido expulsarnos y que estaba diciendo: “Ahora que se van, yo retiro la nube”.

En otra oportunidad, yo estaba recorriendo una quebrada aislada, donde muy pocos extranjeros llegan. Soplaban un viento fuerte. Las pastoras me echaron la culpa, diciendo que este viento aparece cuando una persona desconocida entra a su quebrada. Es que el día anterior a mi llegada, no había ningún soplo de aire.



Figura 7. Laguna chúcaro. Foto: D. Walter.



Figura 8. Alpinistas enfrentándose a una tormenta. Foto: M. Masconi.

En los años 90, varios campesinos me contaron que, si los alpinistas subían a las cumbres, era porque iban a recoger “flores de hielo” que contienen las semillas de la lluvia (Walter, 2002; Walter, 2017c). Con estas flores, podían desviar las lluvias a su antojo, causando sequías localizadas en la región.

En cuanto a la helada, o *qahapu*,¹⁶ dicen que cuando ha caído en la huerta, no hay que pisarla. Si no, el *qahapu* se enoja, y quema las plantas que se encuentran allí. Más antes, para que la helada no malogre los cultivos durante la noche, en la tarde prendían pequeñas fogatas con leña al borde de las chacras.

B) Los Comportamientos Humanos que Tienen Efectos Benéficos a través de Prácticas Rituales

Muchas prácticas rituales, que varían de una comunidad a otra, permiten a los seres humanos comunicar con las diferentes entidades que controlan los fenómenos meteorológicos –que se trate de Dios, de los santos cristianos, de los antepasados míticos o de otros espíritus de la naturaleza. Estos rituales, basados en principios de respeto y reciprocidad, tienen como objetivo llamar o alejar a la lluvia o al viento, según las necesidades del momento. De acuerdo con la situación, estos rituales son llevados a cabo por la comunidad, en el ámbito familiar o de manera individual. Pero hoy en día, muchos de estos rituales ya no se practican. Aquí están algunos ejemplos.

1) Rituales para Llamar a la Lluvia

Los Rituales en las Lagunas – Para llamar a la lluvia, cuando demoraba en aparecer, en algunas zonas, los comuneros subían en grupos a ciertas lagunas, consideradas como investidas de poder. Con sus warakas, lanzaban frutas y otros tipos de comidas adentro de la laguna como ofrendas. La gente de Olleros (en la provincia de Huaraz) iba, por ejemplo, a la laguna Shaqsha o a la laguna Tarara en la quebrada Rurec. Poco después del ritual, empezaba a llover.¹⁷ En otras comunidades, simplemente tiraban piedras dentro de tal laguna con sus warakas. Es como si, al tirar piedras, se despertara el poder o la energía de la laguna, para que trajera la lluvia. Un comunero de Musho me contó que, en el tiempo de sus abuelos, iban a una laguna en la quebrada Ulta, en medio de la cual se encontraba un pequeño montículo. Decían que era una huaca. Si sus piedras alcanzaban la huaca, se ponía a llover. En el caserío de Alpamayo, subían a la laguna Qaraqara, mientras que los comuneros de Quitaracsa botaban piedras dentro de la laguna Millwacocha. Rituales en las lagunas han sido reportados en varios lugares de los Andes (Polia Meconi, 1989: 89;

¹⁶ En el quechua ancashino, según las localidades, se dice *qaha*, *qahapa* o *qahapu* para referirse a la helada.

¹⁷ Mi informante, que tenía 65 años en 2014, me indicó que estos rituales existían todavía en su niñez.

Varas Castrillo y Valcuende del Río, 2021).

Los pobladores de Llupa o Unchus (cerca de Huaraz) subían en grupos a la laguna Awaq, ubicada a 4600 m s.n.m., encima de Willcahuaín. Decían que, más antes, era un lugar chúcaro. Después de llenar un porongo o una pequeña botella con agua de la laguna, la llevaban abajo hasta una capilla o una iglesia, donde la bautizaba el cura. Un detalle importante: en el camino, no había que derramar ni siquiera una gota de agua. (El riesgo era que las lluvias se volvieran torrenciales.) Poco después de la ceremonia con el cura, se ponía a llover. Si la lluvia era suficiente, echaban el agua que habían recogido en el río Awki o en sus propias chacras. Pero en caso de que se pusiera a llover demasiado, había que devolver esta agua a la misma laguna Awaq.¹⁸ Hay que precisar que estos rituales no se llevaban a cabo en cualquier laguna. Si bien la laguna Awaq tenía este poder, me afirmaron que, por ejemplo, la laguna Churup, que se encuentra encima de Huaraz, no lo tenía.

Si recordamos que, según las creencias, las lagunas son la boca de la montaña y que, mediante el concepto de volcán de agua, algunas lagunas están conectadas al océano, esto ayuda a explicar por qué sus aguas sirven para obtener la lluvia (Figura 9).

En la laguna Llanganuco, a veces el cura iba a celebrar una misa en las mismas orillas de la laguna. De igual manera, en varios pueblos se hacían procesiones de petición de lluvias, con las imágenes de los santos, tal como en Huaraz con el Señor de de la Soledad (Yauri Montero, 1993: 130).

Los Rituales con las Momias Prehispánicas – Otro ritual, para llamar la lluvia, consistía en comunicarse directamente con los antepasados míticos o awkilitos. Así, por ejemplo, en Quitaracsa los comuneros iban a una cueva donde se encuentran momias prehispánicas. Agarraban una momia y la sentaban delante de su cueva (Figura 10). Después de ponerle un cigarro en la boca, le ofrecían su coca y su cal, y le pedían ayuda. Algunos días más tarde, empezaba a llover fuerte. Un detalle importante: tenía que ser una calavera de color grisáceo, porque ese color se asemeja a la lluvia. Rituales similares existen en la zona de Conchucos. Venturoli (2011: 256) describe detalladamente una petición de lluvias, desarrollada con los huesos de los antepasados en Acopalca (distrito de Huari). Llamado

awilu turkuy,¹⁹ el ritual está organizado por los ancianos de la comunidad. Prácticas con los huesos existen también en Chichucancha y Hato, encima de Chavín de Huántar

¹⁸ Me indicaron que pocos años atrás todavía practicaban este ritual.

¹⁹ Como lo señala Venturoli (2011: 258), cuelgan la calavera encima de un alto palo. De allí, el nombre del ritual, *awilu turkuy*, porque *turqu* significa vara, palo.



Figura 9. Lagunas percibidas como el ojo o la boca de la montaña. Foto: D. Walter.

(información personal). Estos rituales se fundan en el nexo que existe entre los ancestros prehispánicos y la fertilidad. El uso de las momias como intermediarios de los dioses de la montaña para obtener la lluvia ha sido reportado en otras partes de los Andes (Reinhard, 1983: 43; Polia Meconi, 1989: 79).

El Ritual con las Plantas de Rima Rima – Cabe mencionar también un ritual que se llevaba a cabo con el *rima rima* (*Ranunculus weberbaueri*, Ranunculaceae), una linda flor endémica de los Andes peruanos que crece entre 4100 y 4600 m s.n.m. (Figura 11). En Colcabamba, cerca de Yanama, me contaron que más antes, cuando perduraban

las sequías, iban a arrancar hojas de *rima rima* en cantidad. Las traían a sus casas y las colocaban al pie de la pequeña cruz en el altar familiar. Poco después, se ponía a llover. ¿Pero por qué escogían el *rima rima* para llamar a la lluvia?

En un artículo anterior, había analizado las creencias y prácticas relacionadas con esta planta (Walter, 2017a). El simbolismo, asociado con sus distintos usos, es muy interesante. Como es bien conocido, la flor de *rima rima* tiene un uso mágico: tradicionalmente, cuando los niños demoran en hablar, se les golpea los labios tres veces con



Figura 10. Momia prehispánica. Foto: J. Binder.

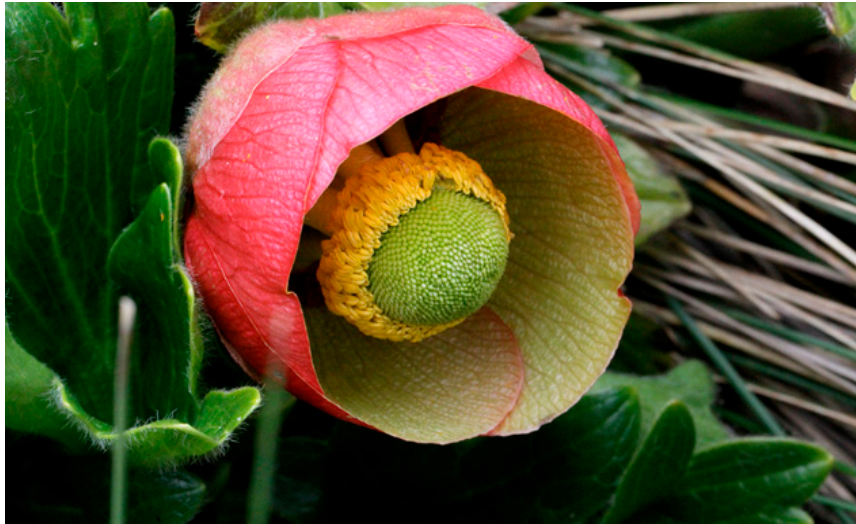


Figura 11. Rima rima (*Ranunculus weberbaueri*, Ranunculaceae). Foto: M. Anger.

la flor, diciendo “*rima rima rima*”. *Rimay* quiere decir “hablar” en quechua. Y así, la palabra empieza a brotar por su boca, desde adentro del cuerpo. Por otro lado, la planta tiene un uso medicinal: sirve para curar el reuma (o reumatismo). Según las creencias, el reuma proviene del agua, que se ha ido acumulando en las articulaciones y los huesos en el transcurso de la vida. Lo que sucede, por ejemplo, si uno ha caminado mucho en lluvias, o cruzado muchos ríos descalzo. Para curarlo, después de chancar las hojas de *rima rima*, se las aplica en cataplasmas sobre el

miembro doloroso. Como la savia de la planta es vesicante e irritante, aplicada sobre la piel provoca ampollas, dejando que el agua salga del cuerpo.

Así, de la misma manera que el *rima rima* hace brotar la palabra por la boca y el agua acumulada en el cuerpo, por una asociación simbólica, los ramos de *rima rima* colocados en el altar familiar tienen el poder de hacer brotar la lluvia del cielo. Eso se debe también a que el *rima rima* crece mayormente en lugares húmedos.



Figura 12. Momia prehispánica. Foto: J. Binder.

Las Quemazones de Pastos – Para llamar a la lluvia, los campesinos tenían también la costumbre de incendiar los pastos, generando mucho humo. Según me comentó uno de ellos, “los ancianos pensaban que el humo iba a cambiarse en nube”. A pesar de las prohibiciones publicadas, entre otras, por el Parque Nacional Huascarán, estas quemazones de pastizales se practican todavía.

2) Rituales para que Se Aleje la Lluvia

Para que se alejara la lluvia, cuando era demasiado abundante, en algunas comunidades la costumbre era la siguiente. Primero, recolectaban gusanos. Después, preparaban una fogata, le echaban sal, y encima tostaban los gusanos vivos en una lata. Una vez tostados, los gusanos eran colocados en un plato, junto con hojas de coca. Se ponía ese plato delante de la casa, como ofrenda a los *awkilitos* (o antepasados míticos). El simbolismo es obvio: los gusanos aparecen cuando llueve. Tostándolos, la situación se invierte y trae un periodo de sequía. Practicaban este ritual en Humacchuco,²⁰ así como en Colcabamba. Mis informantes, de unos 40 o 50 años de edad, se acuerdan de haberlo hecho todavía en su niñez.

En Quitaracsca, también utilizaban las calaveras de las momias prehispánicas. Después de instalar la momia delante de su cueva, le decían:

“*Kananlla puukakunki usyananpaq.*”
“Ahora, vas a soplar, para que escampe.”

Y le regalaban su coca, su asado de papa y le metían un cigarro en la boca. Me explicaron que el humo del cigarro ahuyenta a la lluvia. Hemos visto en el ritual anterior que, para llamar a la lluvia, tenían que escoger una calavera de color grisáceo. Aquí, tiene que ser una calavera de color blanquito. El simbolismo es obvio: el color gris se relaciona con la lluvia, y el blanco con su ausencia (Figura 12).²¹

Por otro lado, un campesino de Quitaracsca me habló de un lugar en su comunidad, llamado Patsapa Shimin (o sea “boca de la tierra”, en quechua). “Había un hueco dentro de la tierra, que estaba tapado con una piedra. Cuando llovía demasiado, la gente iba a sacar la piedra.

Salía aire y este aire soplabla la nube. Después, volvían a tapar el hueco, si no, caía mucha helada.”²²

²⁰ El caserío de Humacchuco, que pertenece a la comunidad Unidos Venceremos (distrito de Yungay), se encuentra cerca de la quebrada Llanganuco.

²¹ En la región de Piura, Polia Meconi (1989: 95) señala también la importancia del color de la calavera en el marco del ritual.

²² Bastien (1978: 48) menciona una cueva, en la tierra de los Kallawayas en Bolivia, de donde también salía aire. Para que este aire soplara las nubes, en caso de lluvias demasiado intensas, le daban el corazón de una llama como ofrenda.

3) Rituales para Llamar al Viento

A veces el viento es deseado. Por ejemplo, cuando yo andaba por los cerros con los lugareños, y nos agarraba la lluvia, me explicaron que para que escampe, uno tenía que arrancarse una pestaña. Y después de soplar tres veces, se lo llamaba al viento por su nombre, gritando “*wiqti wiqti wiqti Lorenzo*”, lanzando al mismo tiempo la pestaña al aire. Un detalle importante: tiene que ser una persona nacida en la temporada seca quien lo haga. Lorenzo es un santo, pero no he podido aclarar por qué le dicen *wiqti*. *Wiqti* quiere decir “legañoso” en quechua. Quizás será porque el viento a veces irrita los ojos, causando como legaña.

Los campesinos también necesitan viento para aventar sus granos, entre otros, el trigo y el chocho (Figura 13). En Quitaracsca, me explicaron que, para llamarlo, había que levantar la cara al cielo, gritando «*wayra wayra*» (o sea “viento, viento”). Y después de dar un fuerte silbido, se le suplicaba al viento, diciendo: “Pedro, *wayrata kachamuy*” (“Pedro, suéltalo al viento.”) Y de pronto aparecía. Como mencionamos anteriormente, San Pedro, tanto como San Pablo, representan al viento.

En Huaripampa, cerca de Colcabamba por el lado de Conchucos, lo invocaban a San Lorenzo regalándole – simbólicamente– un niño o una niña como ofrenda. Le decían:

“San Lorenzo, *aywakallamuy. Kay chinata choluta*”



Figura 13. Mujer aventando granos. Foto: M. Masconi.

apakullanki!"

"San Lorenzo, ven. ¡A esta chica y cholo te vas a llevar!"

Y el viento aparecía de verdad.

Esto nos hace recordar que, en el tiempo de los Incas, se hacían sacrificios de niños no para llamar al viento, sino para pedir lluvia en épocas de sequías; y hasta en tiempos recientes, o sea en los años 1942 y 1945, se han señalado dos casos de estos sacrificios en Perú (Reinhard, 1983: 50-51).

Según la costumbre, para aventar los granos, se prende también una pequeña fogata en un rincón de la chacra. Dicen que el humo tiene el poder de llamarlo al viento.

4) Ritual para Calmar el Shukukuy

En cambio, para calmar el *shukukuy*, estos remolinos de viento que aplastan el maíz, mandaban a sus niños a correr en círculos alrededor de la chacra. No me dieron explicaciones sobre esta práctica. Sin embargo, si nos acordamos del mito recopilado por Carranza Romero (2003: 223), que describe el *shukukuy* como "las almas de los hijos ingratos que van arrastrados por el viento gritando y lamentándose alocados", se podría pensar que el hecho de mandar a hijos inocentes a correr con el *shukukuy*, tenga como consecuencia el calmar estos torbellinos.

Como me lo contó una señora de Humacchuco, "cuando se acerca el *shukukuy*, hay que decir 'kuchi ismay' tres veces, y se va". *Kuchi ismay* significa "excremento de chancho" y corresponde a un insulto. Es como si los insultos tuvieran también el poder de rechazar a los jóvenes ingratos.

El simbolismo de todos estos rituales es muy llamativo y presenta una gran riqueza.

Conclusión

Como lo hemos visto, en la cultura andina tradicional existe una fuerte conexión entre el mundo espiritual, la naturaleza y los seres humanos. Todos estos seres y entidades influyen –en diversos niveles– sobre los fenómenos meteorológicos. Estos son observados minuciosamente e interpretados en un ámbito local. En cierta medida, los mismos conceptos son utilizados por los habitantes de la cordillera para explicar los cambios climáticos y algunas de sus consecuencias (Walter, 2017c).

Sin embargo, con la globalización, el impacto de los medios de comunicación y el avance de la modernidad, la visión que los habitantes de la cordillera tienen de la naturaleza –y del mundo en general– está cambiando. Los nexos que los unen se están debilitando, afectando al mismo tiempo la cohesión social.

Por lo tanto, en cuanto a los rituales que acabo de mencionar, aunque casi todos mis informantes los conocen y son capaces de describirlos detalladamente, por haberlos practicado personalmente o por haber escuchado a sus padres hablar de ellos, pocos son los que los practican hoy en día. Sin embargo, hablan de estos rituales con respeto. Muchas veces, después de describir tal ritual, señalaban que "de verdad, funcionaba". Pero como me lo comentó un amigo campesino, "los jóvenes ya no creen en estas cosas. Y para que funcione, hay que tener fe."²³

Referencias

- Alba Herrera, C. A. (1996). *Huarás: Historia de un pueblo en transformación*. Caraz, Ediciones El Inca.
- Bastien, J. W. (1978). *Mountain of the condor: Metaphor and ritual in an Andean ayllu*. St. Paul, Minnesota, West Publishing Company.
- Bode, B. (1989). *No bells to toll: Destruction and creation in the Andes*. New York, Charles Scribner's Sons.
- Boillat, S. y Berkes, F. (2013). Perception and interpretation of climate change among Quechua farmers of Bolivia: Indigenous knowledge as a resource for adaptive capacity. *Ecology and Society*, 18(4), 21. doi.org/10.5751/ES-05894-180421
- Carranza Romero, F. (2000). *Madre tierra, padre sol; patsa mama, inti yaya: Mitos, leyendas y cuentos andinos*. Trujillo, Editorial Computer Age S.R.L.
- Carranza Romero, F. (2003). *Diccionario quechua ancashino-castellano*. Frankfurt am Main, Iberoamericana Vervuert Verlag.
- Earls, J. y Silverblatt, I. (1978). La realidad física y social en la cosmología andina. París, *Actes du XLII Congrès international des Américanistes*, 4, 299-335.
- Gade, D. W. (1983). Lightning in the folklife and religion of the Central Andes. *Anthropos*, 78(5-6), 770-788.
- García Escudero, M. (2007). El arco iris en la cosmovisión prehispánica centroandina. *Gazeta de antropología*, 23(15). <http://hdl.handle.net/10481/7046>
- Garcilaso de la Vega, I. (1961 [1609]). *The Incas: The royal commentaries of the Inca Garcilaso de la Vega, 1539-1616*. New York, Orion Press.
- Julca Guerrero, C. (2017). Turmanyay wamra. En Julca Guerrero, F. (Ed.), *Voces quechuas, qichwa willakuykuna*, p. 57. Huaraz, Perú, INADEA/Killa Editorial.
- Kapsoli Escudero, W. (Comp.) (1993). *Cuentos y leyendas conchucanas*. Lima, Centro de Información y Desarrollo Integral de Autogestión.
- Orlove, B. S., Chiang, J. C.H. y Cane, M. A. (2004). Etnoclimatología de los Andes. *Investigación y Ciencia*, 330, 77-85.
- ²³ Esta importancia acordada a la fe, y que ya había mencionado en mi artículo anterior (Walter, 2017c), también es subrayada por Boillat y Berkes (2013).

- Plasencia Soto, R. (2015). Santiago, Illapa, la lluvia y el mundo de los ancestros en los Andes: A propósito de una re-lectura de Emilio Choy. *Alma Máter*, 2(3), 127-138.
- Polia Meconi, M. (1988). *Las lagunas de los encantos: Medicina tradicional andina del Perú septentrional* (13). Piura, Central Peruana de Sevicios (CEPESER).
- Reinhard, J. (1983). Las montañas sagradas: Un estudio etnoarqueológico de ruinas en las altas cumbres andinas. *Cuadernos de Historia*, 3, 27-62.
- Varas Castrillo, M. N. y Valcuende del Río, J. M. (2021). Mitos y rituales en torno al agua en la comunidad andina de Cullhuay: De La Viuda al cambio global. *Estudios Atacameños*, 67. <http://dx.doi.org/10.22199/issn.0718-1043-2021-0001>
- Venturoli, S. (2011). *Los hijos de Huari: Etnografía y etnohistoria de tres pueblos de la sierra de Ancash, Perú*. Colección Estudios Andinos 10. Lima, Fondo Editorial, PUCP.
- 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.
- Walter, D. (2017a) Algunos aportes a la etnobotánica en la Cordillera Blanca (Sierra de Ancash). *Indiana*, 34(1), 149-176.
- Walter, D. (2017b). El tarugo (*Hippocamelus antisensis*, Cervidae): Mitos, creencias y prácticas en la Cordillera Blanca del Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2, 103-114.
- Walter, D. (2017c). Percepciones tradicionales del cambio climático en comunidades altoandinas en la Cordillera Blanca, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 9-24.
- 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.
- Yauri Montero, M. (2009). *Simbolismo de las plantas alimenticias nativas en el imaginario andino*. Lima, Universidad Ricardo Palma (Editorial Universitaria).

