



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Año 5, N°7

Abril 2022

ISSN 2519-7649



NÚMERO 7

**REVISTA DE GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA**

REVISTA DE GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Número 7 - Abril 2022

Presidente Ejecutivo*

Dr. Bram L. Willems

Directores y jefes:

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

Dra. Beatriz Fuentealba Durand
Directora de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

Dr. Santiago Madrigal Martínez
Director de Información y Gestión del Conocimiento (DIGC)

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

Dr. Christian Yarleque Galvez
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 Haerberli (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

Abril 2022

Diagramación y diseño: Sabí Torbisco Cervantes y Joan Ramírez Romero

Foto de portada: Dickens Rondan

* La edición y publicación de este ejemplar, se desarrolló durante la gestión de la Dra. Beatriz Fuentealba, presidente ejecutivo del INAIGEM (Marzo 2023)

PRESENTACIÓN

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) es el ente rector en investigación científica y tecnológica en los glaciares y los ecosistemas de montaña en el Perú, su finalidad es generar y fomentar la investigación, con calidad y pertinencia, en beneficio de las poblaciones vinculadas a estos ecosistemas.

En esta oportunidad, el INAIGEM presenta la Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña – Número 7, una publicación periódica que tiene por objetivo difundir los resultados de una serie de trabajos de investigación realizados por investigadores nacionales e internacionales, tanto de manera individual como colaborativa en temáticas relacionadas a los glaciares y ecosistemas de montaña.

Esta edición presenta 14 investigaciones desarrolladas en la Cordillera Blanca y la cordillera Vilcanota; y los departamentos de Apurímac, Áncash, Cusco, Ayacucho; incluye un artículo original y trece resúmenes extendidos. El artículo original, escrito por Wilmer Sánchez Rodríguez, detalla su investigación realizada entre 2015 y 2016 sobre un fenómeno poco conocido de derretimiento en la superficie de glaciares conocido como “crioconitas”. Los trece resúmenes extendidos provienen de pósters presentados durante el Simposio Internacional “Las Montañas: Nuestro Futuro”, organizado por el INAIGEM en Cusco del 10 al 12 de diciembre de 2019. Estos resúmenes ofrecen una perspectiva más detallada de diversos temas como: el monitoreo ecohidrológico en ecosistemas montañosos, la evaluación de la degradación de pastizales y sus alternativas de recuperación, la delimitación de ecosistemas de montaña usando tecnologías de teledetección, el estudio sobre la inseguridad hídrica en hogares de zonas altoandinas, y la gestión ambiental y protección jurídica de los glaciares en Perú, destacando la importancia del manejo sostenible de recursos hídricos y la conservación de los ecosistemas de montaña frente al cambio climático.

El proceso de producción de esta edición se vio demorada a raíz de la pandemia del COVID-19; la necesidad de adaptarse a un entorno laboral remoto representó un desafío adicional para coordinar y mantener la eficiencia en todas las etapas de producción.

Se espera que esta edición sea de gran interés para la comunidad científica, académica, tomadores de decisión y comunidad en general; en especial, que sea un documento de inspiración a favor de la conservación y gestión de los glaciares y los ecosistemas de montaña.

El Editor

CONTENIDO

AGUJEROS DE CRIOCONITA EN EL GLACIAR SHALLAP, PERÚ Wilmer Sánchez Rodríguez	6
MONITOREO ECOHIDROLÓGICO DE LA RECUPERACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE UNA MICROCUENCA EN RONTOCOCHA (ABANCAY, APURÍMAC, PERÚ) Jan R. Baiker	14
ENSAYO DE GERMINACIÓN DE OREOCALLIS GRANDIFLORA, ESPECIE DE IMPORTANCIA ECOLÓGICA EN LOS ECOSISTEMAS DE MONTAÑA Sandra Arroyo Alfaro, Beatriz Fuentealba Durand, Herbert Valverde Balabarca, Melissa Aranda Depaz, Abel Flores Milla	20
EVALUACIÓN DE LAS CAUSAS DE DEGRADACIÓN Y ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DEL PASTIZAL DE ACOCANCHA, COMUNIDAD CAMPESINA CORDILLERA BLANCA, DISTRITO Y PROVINCIA DE RECUAY Angel Antonio Mendoza Granados	25
TEPUI-SAT: ENVIRONMENTAL MONITORING AND SIMULATION SYSTEM FOR CULTIVATION OF VULNERABLE TROPICAL MONTANE WETLAND FLORA SPECIES Mateusz Wrazidlo, Judith Rosales	31
ÁRBOL DE DECISIÓN PARA DELIMITACIÓN DE ECOSISTEMAS DE MONTAÑA EN LA UH PARIAC-RAJUCOLTA, APLICANDO TELEDETECCIÓN Raquel Rios Recra y Beatriz Fuentealba Durand	35
DISEÑO Y APLICACIÓN PILOTO DE LA ENCUESTA DE PRESIONES ANTROPOGÉNICAS EN CUENCAS ALTOANDINAS (EPACA) Fabiola V. Cárdenas Maldonado, Rossi Taboada, Noemí Tomaylla, Lisbeth Pariona, Bram Willems y Chad Staddon	40

EXPERIENCIAS DE INSEGURIDAD HÍDRICA EN HOGARES EN LA COMUNIDAD CAMPESINA DE CHUSCHI (AYACUCHO, PERÚ) Rossi Taboada Hermoza, Fabiola Cárdenas Maldonado, Noemí Tomaylla Berrocal, Doris Lisbeth Pariona Flores, Bram Willems y Chad Staddon	46
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO KÁRSTICO EN EL SECTOR DE PUCAMARCA, CHINCHERO, CUSCO Carlos Wiliam Huaman Susco y Yuosef Gavino Valenzuela Valenzuela	53
VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL GLACIAR ARTESONRAJU EXPLICADA EN ISÓTOPOS DE ¹⁸O Y ²H Lihan del Rocio Hoyos Zarzosa, Luzmila Rosario Dávila Roller, Ibeth Celia Rojas Macedo	59
ANÁLISIS DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS Y MODELAMIENTO DEL BALANCE DE ENERGÍA PARA EL GLACIAR ARTESONRAJU Christian Torres, Jorge Arigony, Tobias Sauter, Anselm Arndt, Wolfgang Gurgiser, Wilson Suarez, Nelson Santillan, Éder Maier	63
EVALUACIÓN DE AEROSOLES DEPOSITADOS EN LA ZONA DE ACUMULACIÓN DEL GLACIAR ARTESONRAJU: 2014-2016 Rolando Cruz, Rafael Figueroa, Wolfgang Gurgiser, Fiorella Quiñonez, Marlene Kronenberg, Alejo Cochachín	69
TEMPERATURA MEDIA INVERNAL DE LA SUPERFICIE TERRESTRE COMO INDICADOR DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CORDILLERA VILCANOTA Hairo León Dextre, Katy Medina Marcos y Edwin Loarte Cadenas	78
GESTIÓN AMBIENTAL Y PROTECCIÓN JURÍDICA DE LOS GLACIARES EN EL PERÚ Zarela Reyes Cubas	84

Agujeros Crioconita en el Glaciar Shallap, Perú

Cryoconite holes in the Shallap Glacier, Peru

Wilmer Sánchez Rodríguez^{1,2}

1 American Climber Science Program, Colorado, EE.UU.

2 Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú

Resumen

La presencia de partículas oscuras sobre los glaciares está ligada a la fusión acelerada de la capa de nieve, debido a que absorben la radiación solar con eficiencia y la transfieren al material gélido en forma de calor. Un legado potencial de estas partículas es la formación de agujeros de crioconita, puesto que al fondo del agujero se encuentra un sedimento oscuro inmerso en agua líquida. A pesar de haber sido registrados en gran parte de la criósfera mundial, existe poca evidencia del registro prolongado de los agujeros de crioconita en un área determinada en los glaciares de la Cordillera Blanca. Aquí, se reporta la aparición de los agujeros de crioconita en el glaciar Shallap por un período de dos años. En este glaciar, los agujeros de crioconita se registraron dentro de un cuadrante de 250 m², por debajo de una altitud de 4900 m s.n.m. El tamaño de los agujeros osciló entre 0.5 a 2 cm de diámetro, de 2 a 8 cm de profundidad, y se encontraron agrupados en áreas de entre 40 a 80 cm². El mayor número de agujeros de crioconita ocurrió durante el 2016, registrándose durante cuatro meses, abarcando incluso los meses húmedos. Finalmente, sugerimos un estudio más completo de los agujeros de crioconita, desde un punto de vista más interdisciplinario.

Palabras clave: Agujeros de crioconita, glaciar Shallap, Cordillera Blanca, glaciología

Abstract

The presence of dark particles on glaciers is linked to the accelerated melting of the snow cover, since they efficiently absorb solar radiation and transfer it to the icy material in the form of heat. One potential legacy of these particles is the formation of cryoconite holes, since at the bottom of the hole is a dark sediment immersed in liquid water. Despite having been recorded in much of the global cryosphere, there is little evidence of a prolonged record of cryoconite holes in any given area in the Cordillera Blanca glaciers. Here, the occurrence of cryoconite holes in Shallap Glacier over a two-year period is reported. In this glacier, cryoconite holes were recorded within a 250 m² quadrant, below an altitude of 4900 m a.s.l. The size of the holes ranged from 0.5 to 2 cm in diameter, from 2 to 8 cm deep, and were found grouped in areas of between 40 and 80 cm². The largest number of cryoconite holes occurred during 2016, being recorded for four months, including the wet months. Finally, we suggest a more complete study of cryoconite holes, from a more interdisciplinary point of view.

Palabras clave: Cryoconite holes, Shallap Glacier, Cordillera Blanca, glaciology

Introducción

El albedo de los glaciares está ligado a la cobertura de nieve superficial. Mientras exista una capa de nieve reciente y prístina, el albedo (capacidad del glaciar para reflejar la luz solar) será mayor. Uno de los factores para la reducción del albedo es la formación de los agujeros de crioconita en la superficie glaciar (Takeuchi, et al., 2001a). Debido a que contienen un sedimento oscuro (crioconita) en la base de los agujeros, esto origina una mayor absorción de luz solar y, por ende, una mayor fusión de nieve (Warren y Wiscombe, 1980). Por lo tanto, los agujeros de crioconita pueden afectar en gran medida el balance de energía del glaciar y, a su vez, contribuir significativamente al retroceso glaciar.

Los agujeros de crioconita fueron descubiertos por primera vez por el explorador Nordenskjöld en 1870 en la capa de hielo de Groenlandia (Gerdel y Drouet, 1960). Estos agujeros comúnmente se forman en la zona de ablación de los glaciares y se componen de un sedimento de color oscuro y agua líquida (Wharton et al., 1985, Cook et al., 2016). Esto sugiere que la acumulación de partículas oscuras en depresiones cóncavas en la superficie glaciar absorbe la luz solar y perfora agujeros casi circulares en forma vertical en la neviza (Figura 1).

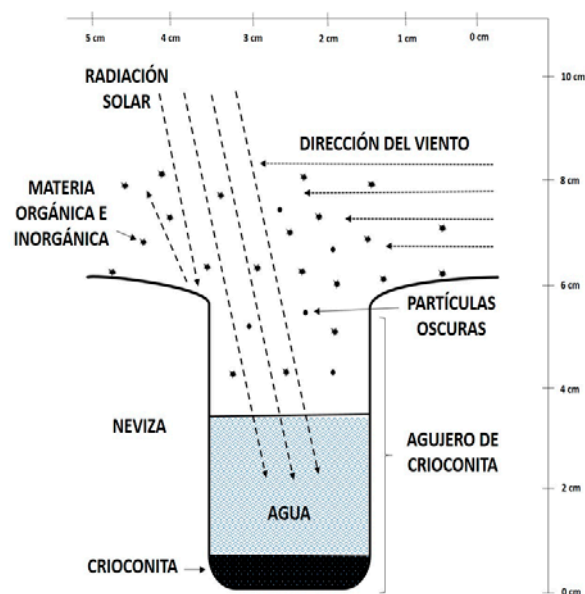


Figura 1. Esquema de un agujero de crioconita y su interacción con su entorno en el glaciar Shallap.

Este sedimento oscuro en el fondo de los agujeros recibe el nombre de “crioconita” y comprende material tanto mineral como biológico. Diversos estudios afirman que la crioconita representa hábitats acuáticos para la vida microbiana (Adams, 1966; Gerdel y Drouet, 1960; Kohshima 1987; Takeuchi et al., 2001a; 2001b, Yoshimura, 1997), entre sus hallazgos se encuentran algas, bacterias, rotíferos, tartágrados, insectos y gusanos de hielo. Esto confirma la existencia de los microorganismos extremófilos en un entorno gélido como los glaciares. Se han reportado agujeros de crioconita en diversas partes del mundo, por ejemplo, en la Antártica (Darcy et al., 2017; Foreman et al., 2007; Sommers et al., 2018), en el Ártico (Willem y Els, 1994; Sawstrom et al., 2002), en glaciares del Himalaya (Takeuchi et al., 2000; Kohshima, 1987), en un glaciar patagónico de Chile (Takeuchi et al., 2001c), y particularmente se tiene algunos reportes en la Cordillera Blanca (Winkler et al., 2009; Aubry-Wake et al., 2015; Cordova, 2018). Esto sugiere que los agujeros de crioconita son comunes en los glaciares de todo el mundo. Sin embargo, aún no existen estudios enfocados en la química y biología de la crioconita en los glaciares de la Cordillera Blanca.

Un estudio describe al detalle la composición de la crioconita en los Alpes Suizos (Baccolo, et al., 2017). Entre sus resultados destaca la presencia de radionúclidos naturales y artificiales, haciendo referencia a una potencial radioactividad de la crioconita. Por otro lado, Darcy et al., 2018, estudiaron la relación del tamaño de los agujeros de crioconita con la cantidad de diversidad bacteriana inmersa. Así mismo, indican que los agujeros próximos entre sí albergan comunidades bacterianas similares a diferencia de los más distantes.

En este artículo, se reporta la presencia de los agujeros de crioconita en el glaciar Shallap de la Cordillera Blanca por un período de dos años. Sin llegar a analizar la química y/o biología de los sedimentos, se pretende motivar a la comunidad científica a realizar más investigación referente a este campo de estudio. Al ser los glaciares de la Cordillera Blanca más vulnerables al cambio climático (Dussaillant et al., 2019), se debe incluir a todos los factores que contribuyen al retroceso glaciar, como es el caso de los agujeros de crioconita.

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el glaciar Shallap (9°20'S, 77°20'W, 4900 m s.n.m., Figura 2), en la provincia de Huaraz, Región Ancash, Perú, a partir de enero de 2015 a diciembre de 2016, abarcando el final de la estación húmeda (enero a abril), la estación seca (mayo a septiembre) y el principio de la estación húmeda (octubre a diciembre) durante dos años. Este glaciar tiene una pendiente relativamente baja en su zona de ablación, donde existe un área cubierta de escombros de roca junto

a la lengua glaciar. La línea de equilibrio (línea que une los puntos de un glaciar donde el balance de masa es nulo, limitando así la zona de acumulación y la zona de ablación de un glaciar) durante la temporada de precipitaciones baja cerca de los 4800 m s.n.m., mientras que durante la temporada de estiaje se encuentra por encima de los 4900 m s.n.m., siendo habitual la ausencia de una cobertura de nieve profunda en la parte baja del glaciar.

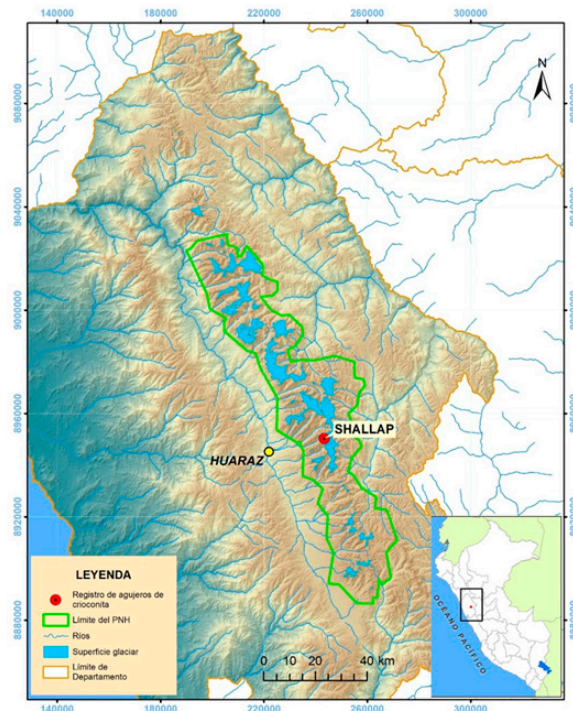


Figura 2. Ubicación del glaciar Shallap dentro de la Cordillera Blanca, Ancash, Perú.

Metodología

Observación de Agujeros de Crioconita

El registro de los agujeros de crioconita se realizó dentro de un área de 250 m² en la lengua del glaciar Shallap por debajo de los 4900 m s.n.m (Figura 3). Para ello se contabilizó el número de agrupaciones de agujeros de crioconita dentro de este cuadrante, sin llegar a contabilizar el número de agujeros dentro de las agrupaciones (Figura 4). Se designó esta área de registro por la facilidad para cubrir el conteo de agujeros y el corto tiempo de permanencia sobre el glaciar. Este procedimiento se ejecutó de manera mensual (excepto cuando había una capa de nieve reciente y profunda, ver Tabla 1) durante el período de estudio. No existe evidencia previa del conteo de agujeros de crioconita en áreas determinadas en los glaciares del mundo, por ello, este estudio pretende informar sobre esto.



Figura 3. Vista del glaciar Shallap. En la zona de ablación se muestra el cuadrante donde se registraron las agrupaciones de agujeros de crioconita durante el período de estudio.

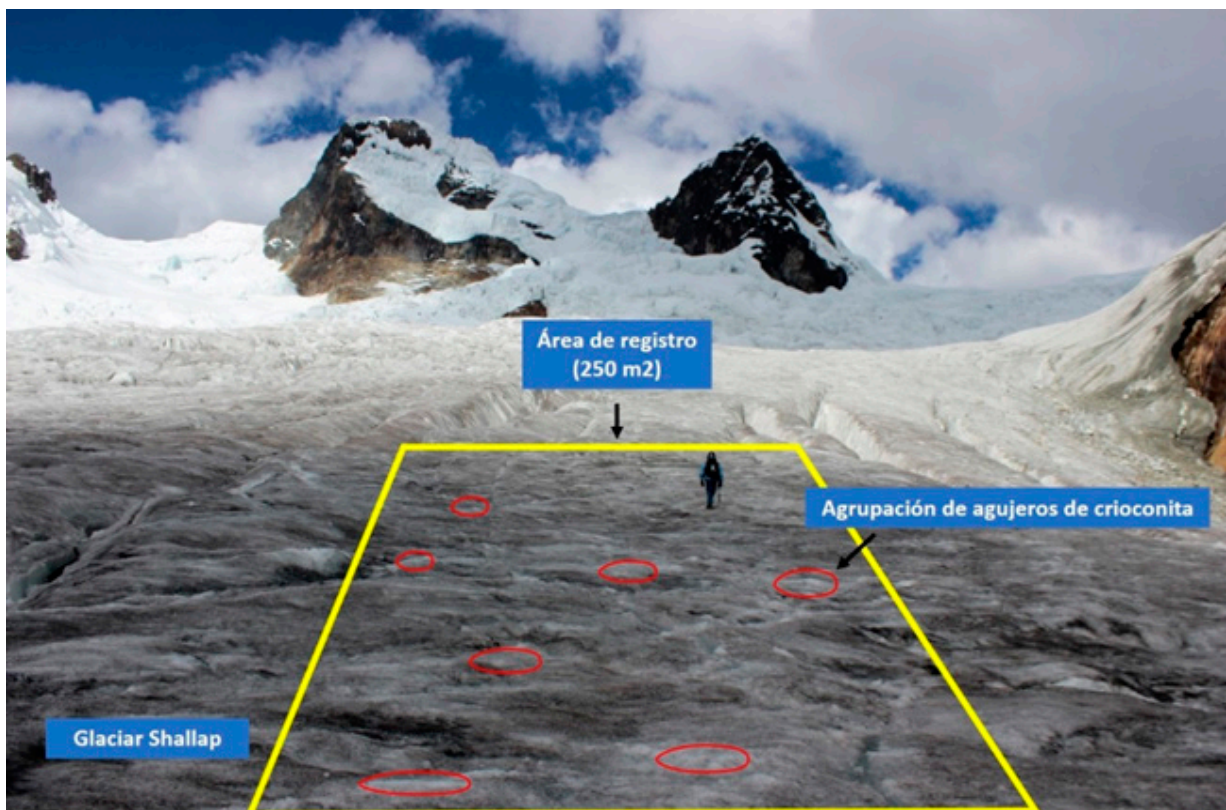


Figura 4. Cuadrante de registro de agrupaciones de agujeros de crioconita en el glaciar Shallap. Los círculos rojos indican de manera referencial la presencia de los agujeros de crioconita.

Tabla 1. Observación de agujeros de crioconita en el glaciar Shallap del 2015 al 2016.

Mes/Año	Registro de agujeros de crioconita	Cobertura Glaciar	Mes/Año	Registro de agujeros de crioconita	Cobertura Glaciar
Ene-15	-	Nieve	Ene-16	-	Nieve
Feb-15	-	Nieve	Feb-16	-	Nieve
Mar-15	-	Nieve	Mar-16	X	Neviza
Abr-15	-	Nieve	Abr-16	X	Neviza
May-15	-	Nieve	May-16	-	Nieve
Jun-15	-	Hielo	Jun-16	-	Hielo
Jul-15	-	Hielo	Jul-16	-	Hielo
Ago-15	-	Nieve	Ago-16	-	Neviza
Sep-15	X	Neviza	Sep-16	-	Hielo
Oct-15	-	Nieve	Oct-16	-	Nieve
Nov-15	-	Nieve	Nov-16	X	Neviza
Dic-15	X	Neviza	Dic-16	-	Nieve

La Tabla 1 muestra los meses en los cuales se observaron los agujeros de crioconita en el glaciar Shallap durante el período de estudio. En general, los agujeros de crioconita se presentaron en una capa de neviza (firn) sobre el glaciar. Esto sugiere que los agujeros se forman durante el proceso de fusión y/o sublimación de la nieve, ya que estas agrupaciones fueron más frecuentes en parches de neviza (nieve compactada por su propio peso antes de convertirse en hielo).

Los agujeros de crioconita se agrupaban en áreas de 40 a 80 cm², cada agujero de crioconita tenía un diámetro de 0.5 a 2 cm en promedio, y una profundidad aproximada de 2 a 8 cm. En la base de estos agujeros se observó sedimentos de color oscuro (crioconita) cubiertos por agua líquida casi hasta el borde de salida del agujero, obviamente en los agujeros con mayor diámetro fue mayor la cantidad de sedimentos (Figura 5).

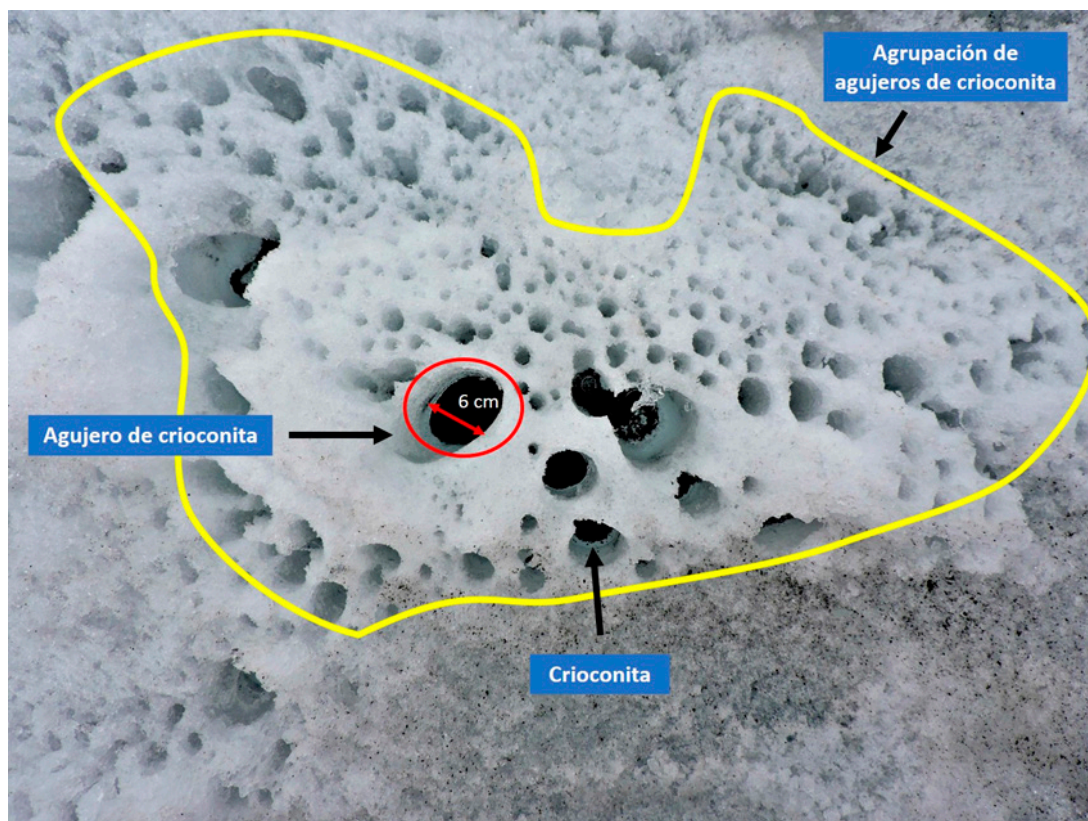


Figura 5. Agrupación de agujeros de crioconita en el área de registro.

El trabajo de campo se realizó durante las mañanas entre las 9:00 y las 11:00 am. En ausencia de una cobertura de nieve, era visible una gran cantidad de agrupaciones de agujeros de crioonita en la zona de ablación del glaciar Shallap (Figura 6), por ello, se estableció un área de 250 m² como cuadrante para el conteo de las agrupaciones. Esto con el fin de tener una estimación del número de agrupaciones en un área determinada. Durante el período de estudio, fue inusual encontrar una capa de nieve reciente y profunda sobre el área de conteo, limitándose a una delgada capa de nieve superficial en proceso de fusión o sublimación, especialmente durante la estación húmeda (octubre a mayo).

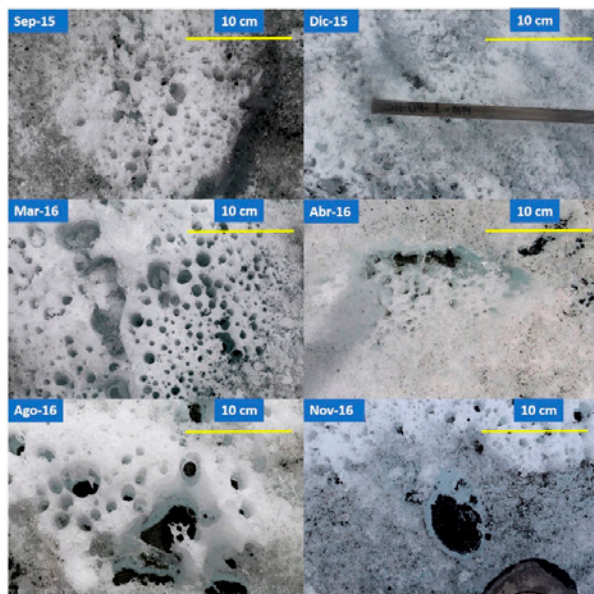


Figura 6. Agujeros de crioonita en el glaciar Shallap durante el período de estudio.

Resultados

Los agujeros observados tenían en su mayoría una forma casi circular o elipsoide y en ocasiones fueron amorfos en su sección horizontal. Todos los agujeros se introducían al glaciar de forma casi vertical. La profundidad de los agujeros de crioonita osciló de 2 a 8 cm (media de 4.5 cm). El diámetro de los agujeros fue de 1.5 a 6 cm (media de 3.5 cm). En la base de los agujeros se visualizó la acumulación de sedimentos de color oscuro (crioonita) cubiertos de agua con una profundidad de 3 a 5 cm (media de 4.0 cm).

Dentro del área de registro, las agrupaciones de agujeros de crioonita se encontraron dispersos en un área de 40 a 80 cm². Una particularidad de esta área es su baja pendiente (<10 grados). Esto genera una baja movilidad por arrastre de los sedimentos finos que, a su vez, se acumulan en pequeñas depresiones cóncavas y permiten la formación de los agujeros de crioonita.

La Tabla 2 muestra el registro de agujeros de crioonita durante el período de estudio en el glaciar Shallap. La altitud indica el inicio del área de registro, es decir, a partir de esa altitud se comenzó el registro de agrupaciones de agujeros de crioonita. La segunda columna indica la pendiente promedio del área de registro. Luego, se indica la fecha de observación de los agujeros de crioonita dentro del período de estudio. La cuarta columna indica el número de agrupaciones de agujeros de crioonita dentro del área de registro. Finalmente, el área cubierta representa la superficie glaciar con presencia de agujeros de crioonita dentro del área de registro (250 m²).

Tabla 2. Registro de agujeros de crioonita en el glaciar Shallap, del 2015 al 2016.

Altitud (m s.n.m.)	Pendiente (°)	Fecha de observación	Nº de agrupaciones de agujeros de crioonita	Área cubierta (m ²)
4810	7	10/10/2015	82	205
4830	9	28/12/2015	77	192.5
4815	8	24/03/2016	71	177.5
4820	7	27/04/2016	93	232.5
4845	8	28/08/2016	69	172.5
4830	9	28/11/2016	78	195

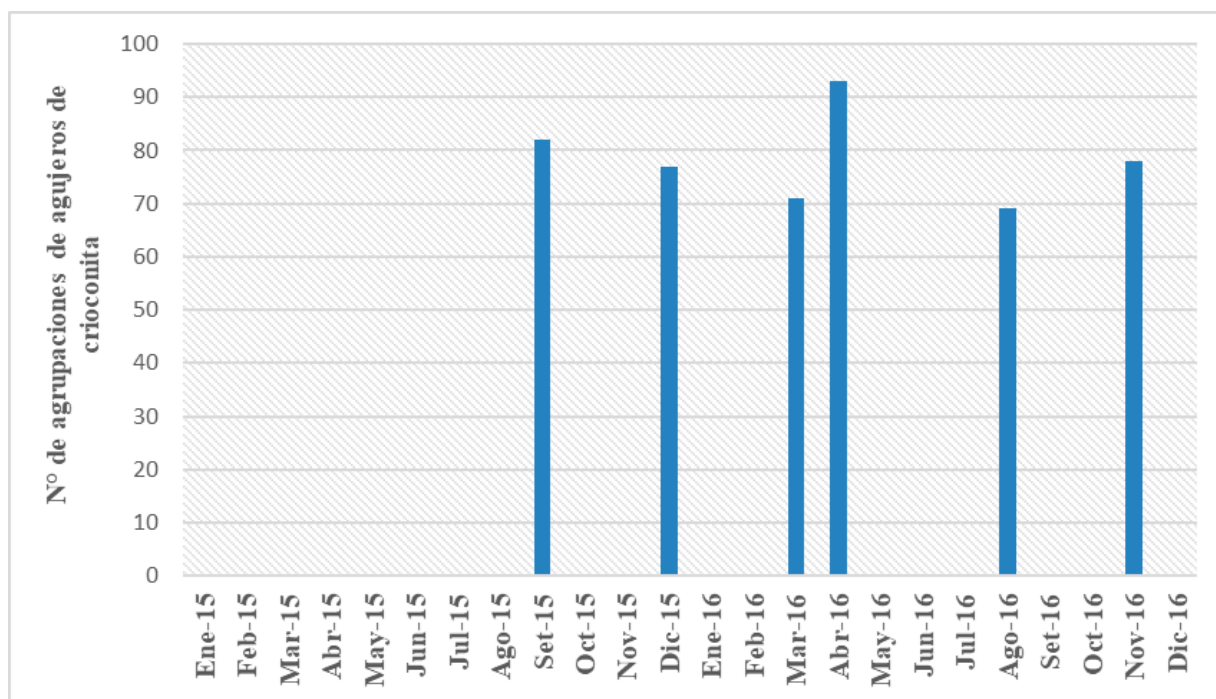


Figura 7. Registro de agrupaciones de agujeros de crioconita en el glaciar Shallap durante el período de estudio.

La Figura 7 muestra el registro de agrupaciones de agujeros de crioconita durante el período de estudio. El mayor número de observaciones de agujeros de crioconita ocurrió en el 2016, llegando incluso a registrarse durante

los meses húmedos (marzo y abril). Las barras azules representan la cantidad de agrupaciones de agujeros de crioconita contabilizados dentro del área de registro (250 m²).

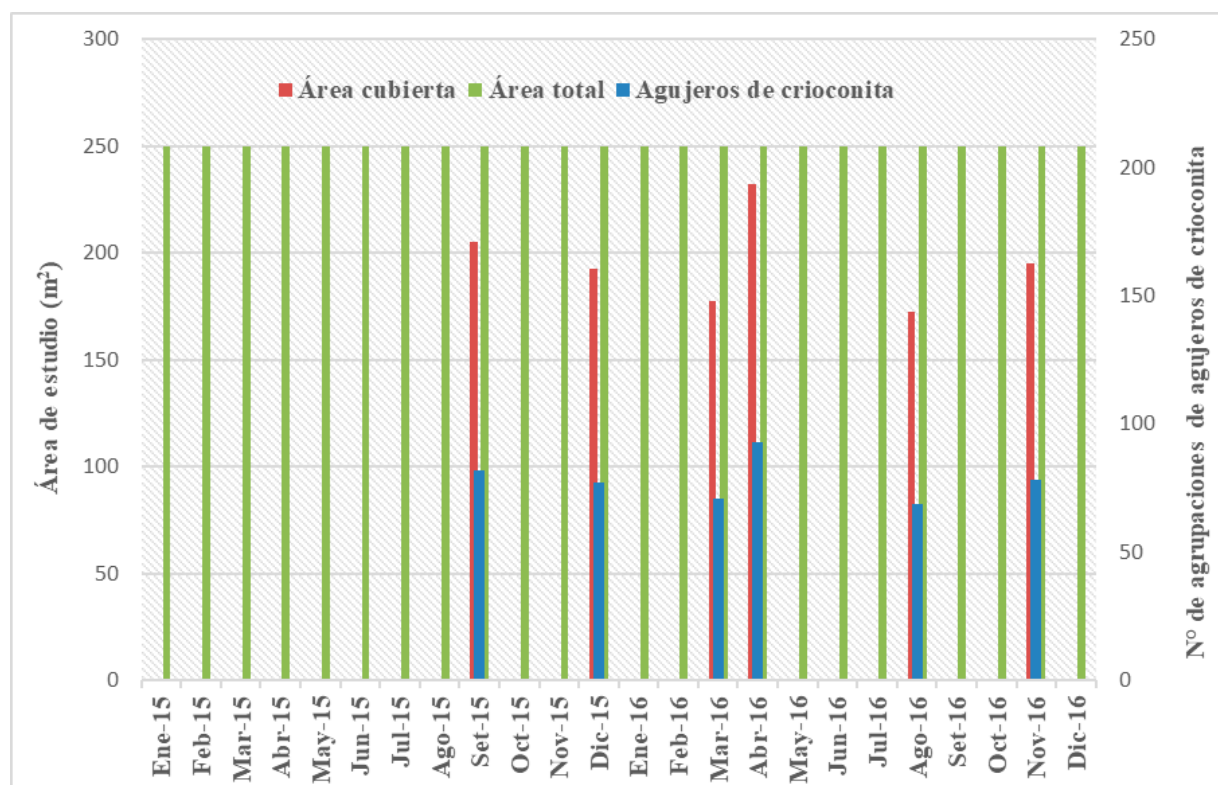


Figura 8. Registro de agrupaciones de agujeros de crioconita en relación al área de registro (250 m²).

La Figura 8 muestra el número de agujeros de crioonita en relación al área de registro durante el período de estudio. Las barras azules representan la cantidad de agrupaciones de agujeros de crioonita. Las barras verdes representan el área de registro (250 m²), y las barras rojas representan el área cubierta por agujeros de crioonita dentro del área de registro. La mayor área cubierta con agujeros de crioonita dentro del cuadrante de observación se registró en abril del 2016.

Conclusiones

La presencia de partículas oscuras sobre el glaciar Shallap es causante de la formación de agujeros de crioonita, especialmente en la zona de ablación. Este sedimento oscuro en el fondo de los agujeros denominado crioonita absorbe la luz solar y perfora la neviza en forma vertical. Es este estudio, se reporta la aparición de los agujeros de crioonita en la superficie del glaciar Shallap por un período de dos años.

Los resultados indican que los agujeros de crioonita se forman con frecuencia en la zona de ablación del glaciar (<4900 m s.n.m.), y en área con baja pendiente (<10°). El mayor registro de agujeros de crioonita ocurrió en el 2016, incluso durante los meses de alta precipitación (marzo y abril). Así mismo, durante el 2015 se registraron los agujeros de crioonita al inicio de la temporada húmeda (septiembre y diciembre). Esto contrasta con la ausencia de una cobertura de nieve reciente en la zona de ablación del glaciar, la cual se percibió durante las expediciones de campo en esos meses.

Actualmente, se cuenta con una amplia evidencia de la presencia de microorganismos extremófilos inmersos en la crioonita. Sin embargo, no existen estudios enfocados en describir la biología y/o química de los agujeros de crioonita en la Cordillera Blanca. Esto incluye una descripción detallada de los elementos y compuestos orgánicos en la crioonita, ya que, debido a su ubicación, los glaciares de la Cordillera Blanca podrían albergar distintas formas de vida en comparación con lo hallado en los polos o glaciares de otras partes del globo. Por otro lado, también debe estudiarse el impacto de los agujeros de crioonita en el retroceso de los glaciares, en particular en su contribución para la reducción del albedo. Así mismo, es necesario evaluar la dispersión de los vientos dominantes, esto permitirá determinar la procedencia de los contaminantes (aerosoles). Dicho esto, es meritorio un enfoque interdisciplinario en el estudio de los agujeros de crioonita, que abarque glaciología, biología, hidrología, meteorología, climatología, geología.

Agradecimientos

Agradezco al American Climber Science Program de los Estados Unidos de América por subvencionar el trabajo de campo. También un agradecimiento especial a los pobladores del centro poblado de Jancu, en especial a los guardianes de la quebrada Shallap por su gentileza con el personal de campo. En memoria de Leonel Figueroa Gloria, que los apus te tengan bajo su cobijo, mi amigo.

Referencias

- Adams, W. P. (1966). Ablation and run-off on the White Glacier, Axel Heiberg Island, Canadian Arctic Archipelago. Axel Heiberg Island Research Reports: Glaciology N° 1. McGill University, Montreal.
- Aubry-Wake, C., Baraer, M., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Wigmore, O., Hellstrom, R. A., Lautz, L. y Somers, L. (2015). Measuring glacier surface temperatures with ground-based thermal infrared imaging. *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8489-8497. doi:10.1002/2015GLD65321
- Baccolo, G., Di Mauro, B., Massabo, D., Clemenza, M., Nastasi, M., Delmonte, B., Prata, M., Prati, P., Previtali, E. y Maggi, V. (2017). Cryoconite as a temporary sink for anthropogenic species stored in glaciers. *Scientific Reports*, 7:9623. doi:10.1038/s41598-017-10220-5
- Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N. y Irvine-Fynn, T. (2016). Cryoconite: The dark biological secret of the cryosphere. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 66-111. doi:10.1177/0309133315616574
- Cordova, M. K. (2018). Determinación de compuestos orgánicos persistentes en hielo y sedimentos de la laguna en formación, en contacto con la cobertura glaciar Pastoruri, Cordillera Blanca al 2017. Tesis de titulación. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3346>
- Darcy, J. L., King, A. J., Gendron, E. M. S. y Schmidt, S. K. (2017). Spatial autocorrelation of microbial communities atop a debris-covered glacier is evidence of a supraglacial chronosequence. *FEMS Microbiology Ecology*, 93, 7287-7290. Doi:10.1093/femsec7fix095
- Darcy, J. L., Gendron, E. M. S., Sommers, P., Porazinska, D. L. y Schmidt S. K. (2018). Island Biogeography of Cryoconite Hole Bacteria in Antarctica's Taylor Valley and Around the World. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6:180. doi:10.3389/fevo.2018.00180
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. y Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*. doi:10.1038/s41561-019-0432-5
- Foreman, C. M., Sattler, B., Mikuchi, J. A., Porazinska, D. L. y Priscu, J. C. (2007). Metabolic activity and diversity of cryoconite in the Taylor Valley, Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 112, G04S32. doi:10.1029/2006JG000358

Gerdel, R. W. y Drouet, F. (1960). The cryoconite of the Thule Area, Greenland. *Transactions of the American Microscopical Society*, 79(3), 256-272.

Kohshima, S. (1987). Formation of dirt layers and surface dust by micro-plant growth in Yala (Dakpatsen) Glacier, Nepal Himalayas. *Bulletin of Glacier Research*, 5, 63-68.

Sawstrom, C., Mumford, P., Marshall, W., Hodson, A. y Laybourn-Parry, J. (2002). The microbial communities and primary productivity of cryoconite holes in an Arctic glacier (Svalbard 79° N). *Polar Biology*, 25, 591-596.

Sommers, P., Darcy, J. L., Gendron, E. M. S., Stanish, L. F., Bagshaw, E. A., Porazinska, D. y Schmidt S. K. (2018). Diversity patterns of microbial eukaryotes mirror those of bacteria in Antarctic cryoconite holes. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(1). doi:10.1093/femsec/fix167

Takeuchi, N., Kohshima, S., Seko, K. y Fujita, K. (2000). Characteristics of cryoconite holes on a Himalayan glacier, Yala Glacier central Nepal. *Bulletin of Glaciological Research*, 17: 51-59.

Takeuchi, N., Kohshima, S., Goto-Azuma K. y Korner, R. M., (2001a). Biological characteristics of dark colored material (cryoconite) on Canadian Arctic glaciers (Devon and Penny ice caps). *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue*, 54: 495-505.

Takeuchi, N., Kohshima, S. y Seko, K. (2001b). Structure, formation, darkening process of albedo reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33, 115-122.

Takeuchi, N., Kohshima, S., Shiraiwa, T. y Kubota, K. (2001c). Characteristics of cryoconite (surface dust on glaciers) and surface albedo of a Patagonia glacier, Tyndall Glacier, Southern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glaciological Research*, 18: 65-69.

Warren, S. G. y Wiscombe, W. J. (1980). A model for the spectral albedo of snow II: Snow containing atmospheric aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), 2734-2745. doi:10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2

Wharton, R. A., McKay, C. P., Simmons, G. M. y Parker, B. C. (1985). Cryoconite holes on glaciers. *BioScience*, 35, 449-503.

Willem, H. D. y Els, A. V. (1994). Rotifera and tartigrada from some cryoconite holes on a Spitsbergen (Svalbard) glacier. *Belgian Journal of Zoology*, 124(1), 27-37.

Winkler, M., Juen, I., Molg, T., Wagnon, P., Gómez, J. y Kaser, G. (2009). Measured and modelled sublimation on the tropical Glaciar Artesonraju, Perú. *The Cryosphere*, 3, 21-30.

Yoshimura, Y., Kohshima, S. y Ohtani, S. (1997). A community of snow algae on a Himalayan Glacier: Change of algal biomass and community structure with altitude. *Arctic and Alpine Research*, 29, 128-139.

Monitoreo Ecohidrológico de la Recuperación de Servicios Ecosistémicos de una Microcuenca en Rontoccocha (Abancay, Apurímac, Perú)

Ecohydrological Monitoring of the Recovery of Ecosystem Services in a Microbasin in Rontoccocha (Abancay, Apurímac, Peru)

Jan R. Baiker^{1,2,3} (jbaiker@gmail.com)

1 Consultor del Programa Bosques Andinos (HELVETAS Swiss Intercooperation y CONDESAN), www.bosquesandinos.org

2 University of Zurich, Department of Geography, Research Group on Environment and Climate ECLIM, eclim-research.ch

3 Asociación para la Conservación y Estudio de Montañas Andinas-Amazónicas (ACEMAA) Cusco - Perú, acemaa.org

Resumen

Últimamente, las cabeceras de cuenca han recibido mayor atención a través de proyectos de inversión en la siembra y cosecha de agua, lo que incluye tanto la infraestructura gris (pequeñas y grandes represas), como también la infraestructura semi-natural (p. ej. q'ochas), proyectos de reforestación, y proyectos para la recuperación de pajonales/pastizales y bofedales. Los últimos proveen un conjunto importante de servicios ecosistémicos (SE), incluyendo el almacenamiento y la regulación de los flujos de agua y la secuestración de carbono. Aparte de los impactos antrópicos directos (pastoreo, construcción de carreteras y represas), los bofedales y sus SE se encuentran impactados por el cambio climático que causa temperaturas más altas y cambios en el régimen de precipitaciones.

Bajo estas tendencias y en el contexto de la implementación de un Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MRESE) para la ciudad de Abancay (Apurímac), se instaló a partir del 2016 un sistema de monitoreo ecohidrológico o SMEH (incluyendo mediciones de parámetros hidrológicos y ecológicos/botánicos claves) en seis bofedales en el área de Rontoccocha, donde se aplicó la metodología de microcuencas pares: una intervenida con acciones de recuperación de los ecosistemas, y otra no-intervenida que sigue siendo impactada por actividades antrópicas. El análisis preliminar de los datos registrados hasta la fecha muestra que en el transcurso de un año de mediciones mensuales en un total de 18 tubos de observación (tres en cada bofedal), las napas freáticas en los tres bofedales en la microcuenca intervenida bajaban más que en los tres bofedales en la microcuenca no-intervenida, llegando a profundidades máximas de casi 90 cm debajo de la superficie del suelo. Estos datos se interrelacionan con las tendencias que muestran los demás parámetros monitoreados y que actualmente están siendo analizados, logrando así una primera evaluación de la efectividad de las acciones ejecutadas en la microcuenca intervenida.

Palabras clave: Sistema de monitoreo ecohidrológico, Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA), mecanismo de retribución por servicios ecosistémicos (MRESE), siembra y cosecha de agua (S&CA), bofedal, Rontoccocha, río Mariño, Abancay, Apurímac

Abstract

Recently, headwaters have received more attention through investment projects in sowing and harvesting water, which includes both gray infrastructure (small and large dams) as well as semi-natural infrastructure (e.g. q'ochas), reforestation projects and the recovery of grasslands and wetlands. The latter provide an important set of ecosystem services (ES), including water storage and water flow regulation and carbon sequestration. Apart from the direct anthropogenic impacts (grazing, construction of roads and dams), the wetlands (bofedales) and their ES are impacted by climate change that causes higher temperatures and changes in the precipitation regime.

Under these trends and in the context of the implementation of a Remuneration Mechanism for Ecosystem Services (MRESE in Spanish) for the city of Abancay (Apurímac), an ecohydrological monitoring system or SMEH in Spanish (including measurements of key hydrological and ecological/botanical parameters) in six bofedales in the Rontoccocha area, where the paired microbasin methodology was applied: one intervened with ecosystem recovery actions, and another non-intervened that continued to be impacted by anthropic activities. Preliminary analysis of the data recorded to date shows that in the course of a year of monthly measurements in a total of 18 observation wells (three in each wetland), the water tables in the three wetlands in the intervened microbasin dropped more than in the three bofedales in the non-intervened microbasin, reaching maximum depths of almost 90 cm below the soil surface. These data are interrelated with the trends shown by the other monitored parameters that are currently being analyzed, thus achieving a first evaluation of the effectiveness of the actions carried out in the intervened microwatershed.

Keywords: Ecohydrological monitoring system, Regional Initiative for Hydrological Monitoring of Andean Ecosystems (iMHEA), retribution mechanism for ecosystem services (MRESE), water sowing and harvesting (S&CA), bofedal, Rontoccocha, Mariño River, Abancay, Apurímac

Introducción

Durante los últimos años, las cabeceras de cuenca (alto)andinas han recibido mayor atención a través de proyectos de inversión en la siembra y cosecha de agua (S&CA), lo que incluye tanto la infraestructura gris (pequeñas y grandes represas, canales, etc.), como también la infraestructura seminatural (p. ej., q'ochas), y actividades de recuperación/restauración de los ecosistemas (proyectos de reforestación y para la recuperación de pajonales/pastizales, humedales y bofedales). Los últimos proveen un conjunto importante de servicios ecosistémicos (SE), como, p. ej., el almacenamiento (temporal) (Chimner et al., 2019) y la regulación de los flujos del agua (Gordon et al., 2015), la secuestro de carbono (Cooper et al., 2010), entre otros. Aparte de los impactos antrópicos directos (pastoreo, construcción de carreteras y represas, quemadas, etc.), los ecosistemas (alto) andinos y sus SE se encuentran impactados por el cambio climático, causando temperaturas más altas y cambios en el régimen de precipitaciones (Imfeld et al., 2020).

Considerando estas tendencias y en el contexto de la implementación de un Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MRESE) (CTB/ENABEL, 2018) para la ciudad de Abancay, se instaló a partir del 2016 un sistema de monitoreo ecohidrológico (SMEH) para la medición continua o frecuente de parámetros hidrológicos, ecológicos/botánicos claves en dos microcuencas en el área de Rontoccocha (Abancay) en el norte de la región Apurímac, Perú (Figura 1). Aunque las dos microcuencas no son parte del sistema de abastecimiento de agua - manejado por la Empresa Municipal de Servicios de Agua

Potable y Alcantarillado de Abancay (EPS EMUSAP SA) - de la ciudad de Abancay, estas cumplen un rol importante a través de la provisión de agua para el consumo humano y para las actividades agropecuarias de dos comunidades locales (Atumpata y Micaela Bastidas) y por ende pueden mitigar (potenciales) conflictos sobre el uso del agua entre la población urbana (ciudad de Abancay) y rural del distrito de Abancay (CTB/ENABEL, 2018). Además, el actual SMEH en Rontoccocha - con la microcuenca intervenida (área: 2.4 km²; perímetro: 7.22 km) y testigo (área: 1.56 km²; perímetro: 5.22 km) (Gil-Ríos y De Bièvre, 2016) - sirve de "laboratorio al aire libre" para evaluar la efectividad de algunas técnicas de S&CA, para replicarlas en la microcuenca principal (14.66 km²) donde se ubica la represa principal de Rontoccocha (Figura 1) - construido en el año 2000 y modificado y ampliado en 2019 - que hasta ahora ha abastecido aproximadamente 25% del agua (CTB/ENABEL, 2018) para los 69,028 habitantes (INEI, 2018) del distrito de Abancay.

Métodos

El SMEH en Rontoccocha es parte de la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA), que constituye una red de sitios de monitoreo hidrológico a lo largo de los Andes, en los cuales se aplica la metodología de microcuencas pares (Ochoa-Tocachi et al., 2018). Las microcuencas pares, idealmente, se encuentran muy próximas, mostrando condiciones geofísicas y climáticas muy parecidas, y están monitoreadas durante suficiente tiempo para generar una línea de base que permite hacer comparaciones entre ellas. Luego, se interviene en una de las microcuencas con acciones de

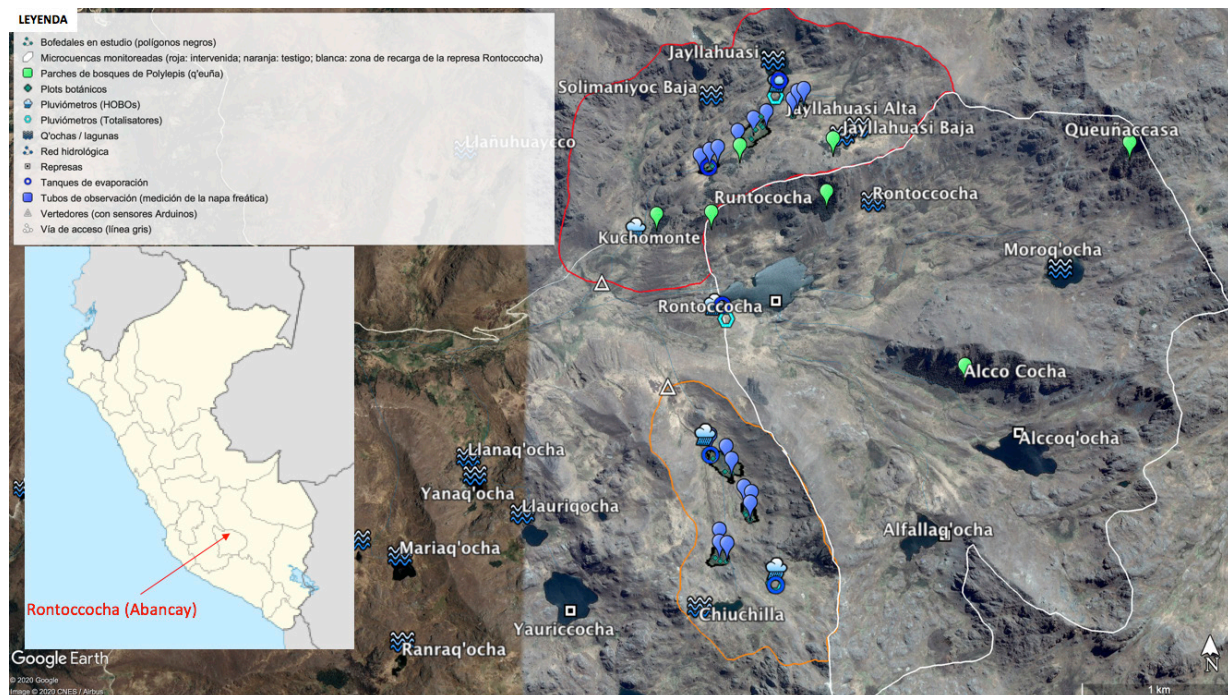


Figura 1. Mapa detallado del SMEH en Rontoccocha. Nota: En el caso de "Solimaniyoc Baja" se trata de dos q'ochas que están interconectadas. Fuentes: Elaboración de Jan R. Baiker sobre la base del programa Google Earth y Wikipedia (mapa pequeño).

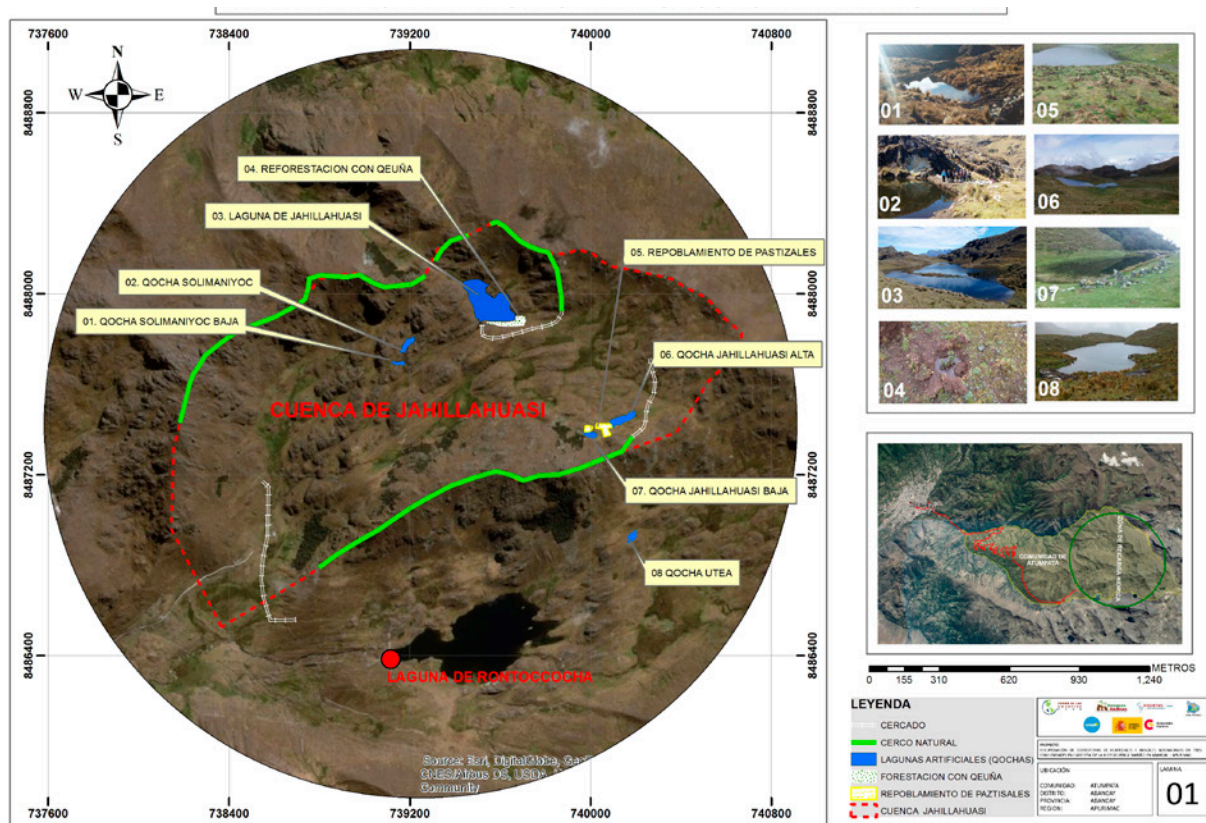


Figura 2. Mapa de la zona de recarga hídrica de la comunidad de Atumpata. Fuente: CEDES Apurímac.

recuperación (p. ej., con técnicas de S&CA), mientras que la otra microcuenca (de control/testigo) sigue recibiendo los impactos de siempre. Esta metodología permite evaluar el impacto (positivo) que tienen ciertas intervenciones de recuperación sobre la ecohidrología de la respectiva microcuenca, especialmente sobre los caudales que se generan en estas microcuencas.

Un componente importante e integral para la regulación hídrica en microcuencas de las cabeceras de cuencas altoandinas consiste en los bofedales. Como se los encuentra en las partes planas, en depresiones o ligeramente inclinadas (MINAM, 2019a), se los puede denominar ecosistemas de paso o tránsito para los caudales y/o escorrentías que corren desde las partes altas a las partes bajas de una microcuenca. Esta característica los hace especialmente interesantes como indicadores o sensores de cambio en el sistema hidrológico local. Intervenciones de S&CA (p. ej., las q’ochas) en las partes altas de microcuencas pretenden causar un impacto positivo sobre las profundidades de las napas freáticas de los bofedales que se encuentran a menor altitud, siempre y cuando exista una conexión hidrológica entre ambos. Se los considera bofedales en buen “estado de salud ecosistémico” cuando, en el transcurso de un año, sus napas freáticas no bajan más de los 55-60 cm de profundidad desde la superficie del suelo (MINAM, 2019b). Si las napas freáticas no bajan más de 5-20 cm, las condiciones hidrológicas son óptimas (MINAM, 2019b).

En el caso de Rontoccocha, ambas microcuencas muestran condiciones geofísicas parecidas: a) la geología de las partes altas y medias está compuesta por cuerpos intrusivos de ortogneis que se caracteriza por su baja permeabilidad (Villacorta et al., 2019). Por ende, no se esperan flujos subterráneos profundos, más bien exclusivamente superficiales y subsuelos (a poca profundidad); b) ambas microcuencas cuentan con una laguna natural en la parte alta. En la microcuenca intervenida, se ha implementado, a partir del año 2014, las siguientes técnicas de S&CA (Figura 2): I) cercado de la microcuenca, II) construcción de cinco q’ochas (finalizadas en la segunda mitad del 2017), III) reforestación con especies nativas (*Polylepis* sp. y otras) y IV) resiembra de pastos nativos. La instrumentación mínima que tiene cada sitio iMHEA consiste en dos pluviómetros autónomos (HOBO: modelo con colector de inflexión / cubeta basculante y registrador de datos / datalogger) y un sensor (con datalogger) para medir continuamente el nivel del caudal en la parte más baja de cada una de las dos microcuencas (Ochoa-Tocachi et al., 2018). La elección de las dos microcuencas pares y su respectiva instrumentación mínima en Rontoccocha fue diseñada por Gil-Ríos y De Bièvre (2016) y luego fue ampliada a un SMEH (véase Figura 1) por el autor de este artículo, en conjunto con un grupo de asistentes de campo (véase la sección de Agradecimientos). Para permitir una comparación, cada una de las dos microcuencas monitoreadas está

equipada con los siguientes instrumentos de medición (manual y automático): a) dos pluviómetros automáticos (que también miden la temperatura del aire), uno en la parte alta y otro en la parte baja, b) un totalizador (pluviómetro manual) en la parte alta, c) un vertedero con sensor de medición de caudal (en la parte más baja), d) dos tanques de evaporación en la parte baja o media y alta, e) nueve tubos de observación (en la entrada, en el centro y en la salida de cada uno de los tres bofedales monitoreados) y f) 21 (microcuenca intervenida) y 20 cuadrantes (plots) botánicos (microcuenca testigo), respectivamente. Adicionalmente, están instalados un pluviómetro digital, un totalizador y un tanque de evaporación en la parte más baja de la microcuenca de la represa de Rontoccocha (Figura 1). Para el presente artículo, se ejecutó un primer análisis comparativo con los datos registrados por a), c) y e).

Resultados

Precipitación

Aún no se ha hecho un análisis detallado y comparativo con los registros de precipitación de los cinco pluviómetros autónomos en Rontoccocha. Sin embargo, una evaluación cualitativa preliminar indica que existe poca variación en el régimen de precipitación entre ambas microcuencas monitoreadas. Una primera evaluación con los datos provenientes de los dos pluviómetros autónomos de la microcuenca intervenida muestra valores promedio anuales de 989.50 mm (2017-2018) y 1224.40 mm (2018-2019) de precipitación.

Además, se observa que 80% (2017-2018) y 69% (2018-2019) de esta cantidad de lluvia anual fue registrada durante los meses de enero-marzo.

Caudales

Se tiene registros (cada cinco minutos) de los caudales en Rontoccocha desde diciembre 2015 (microcuenca intervenida, quebrada Llantupa) y abril 2017 (microcuenca testigo, quebrada Michincca), respectivamente, hasta la actualidad. Para este artículo, se han analizado los datos de ambos caudales hasta agosto 2019. En las Figuras 3 y 4, se notan los periodos con vacíos de registros. Lo más resaltante de la comparación de los caudales en ambas microcuencas es tanto los valores máximos (quebrada Llantupa: 909 l/s, registrado el 23 de febrero de 2017 a las 11.16 p.m.; quebrada Michincca 532 l/s, registrado el 15 de febrero de 2018 a las 2.28 a.m.) y mínimos (quebrada Llantupa: 0.05 l/s, registrado el 6 de diciembre de 2015 a las 10.05 a.m.; quebrada Michincca: 0 l/s, varios registros entre julio y diciembre de 2018) alcanzados, y sobre todo el desarrollo del flujo base (base flow) durante el periodo registrado. Se observa un flujo base continuo en la microcuenca intervenida (quebrada Llantupa), mientras que en la microcuenca testigo (quebrada Michincca) hay varios periodos durante los cuales no se registró ningún flujo de agua en el respectivo vertedero, probablemente debido, en gran parte, a la construcción de una trocha a unos 100 m quebrada arriba del vertedero que entre julio y diciembre de 2018 estaba modificando el flujo natural del agua en la respectiva quebrada (Figura 4).

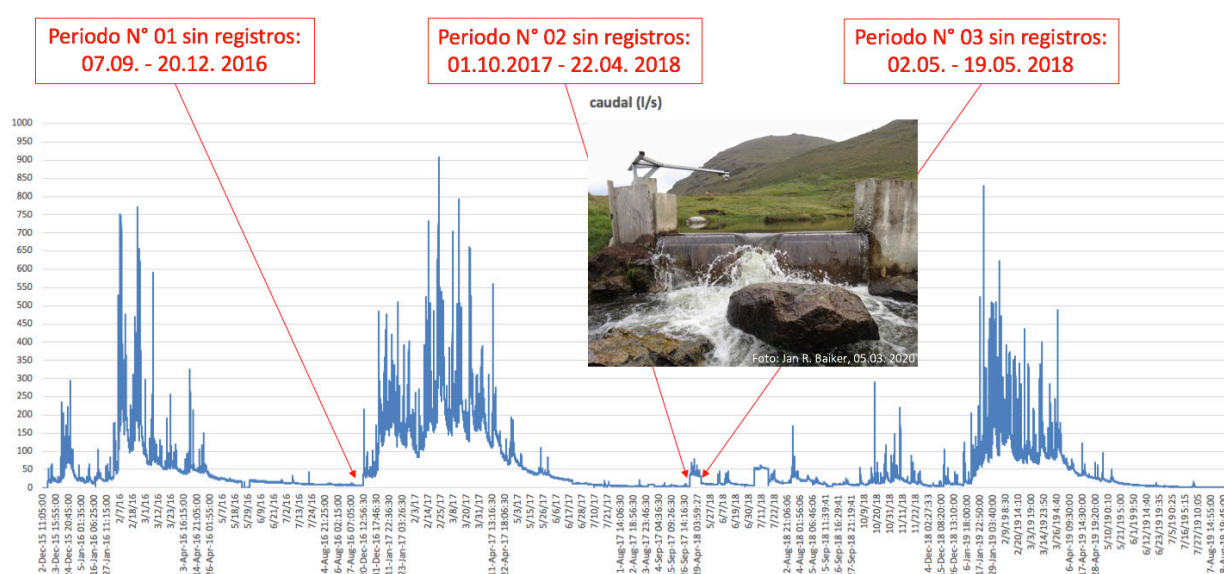


Figura 3. Serie completa del registro de datos (diciembre 2015 - agosto 2019) del caudal de la quebrada Llantupa en el vertedero de la microcuenca intervenida del SMEH en Rontoccocha, indicando también los tres periodos sin registros. Fuente: Jan R. Baiker.

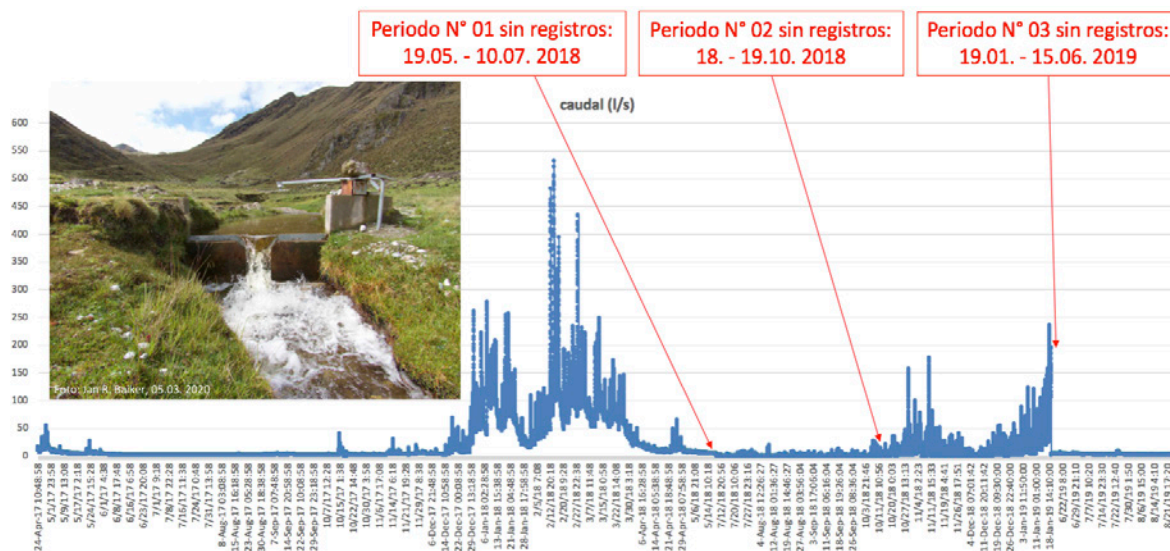


Figura 4. Serie completa del registro de datos (abril 2017 - agosto 2019) del caudal de la quebrada Michincca en el vertedero de la microcuenca testigo del SMEH en Rontoccocha, indicando también los tres periodos sin registros. Fuente: Jan R. Baiker

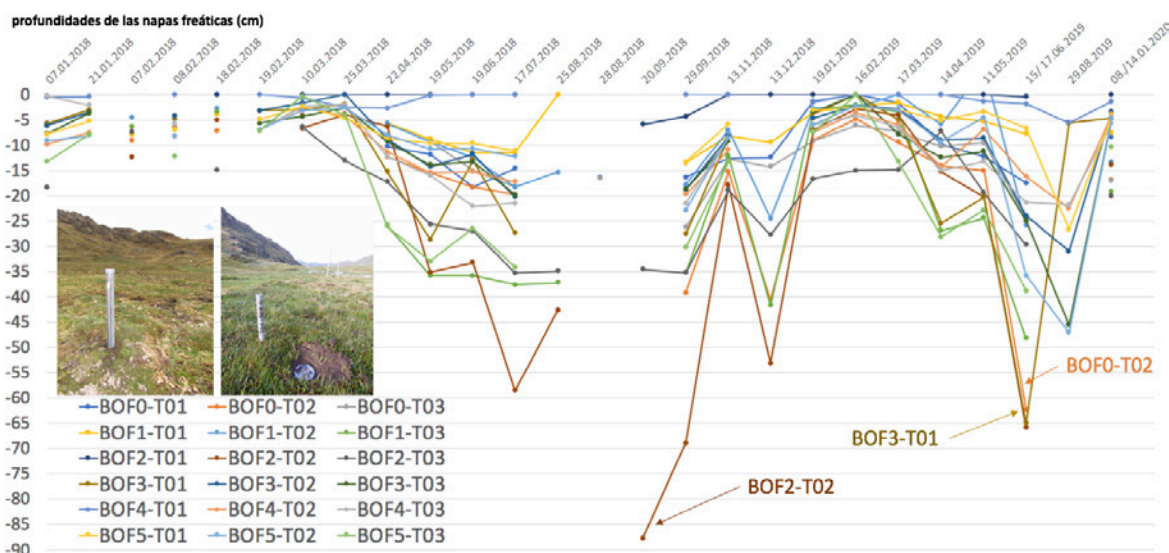


Figura 5. Variación de la profundidad de las napas freáticas en el periodo entre enero 2018 y enero de 2020 en los seis bofedales del SMEH en Rontoccocha. El eje vertical indica las profundidades (medidas en cm debajo de la superficie de suelo, por eso el signo "-"). BOF0, BOF1 y BOF2 se encuentran en la microcuenca intervenida (la enumeración asciende desde el bofedal más alto al bofedal más bajo); BOF3, BOF4 y BOF5 se ubican en la microcuenca testigo (la enumeración asciende desde el bofedal más bajo al bofedal más alto). Los tubos T01 se encuentran en la entrada, T02, en el centro y los T03 en las salidas de los bofedales. Fuente: Jan R. Baiker.

Napas Freáticas en los Seis Bofedales

Se observa (Figura 5) que en seis de los 18 puntos monitoreados la napa freática no bajó más de los 20 cm de profundidad. Los 12 puntos de monitoreo en los cuales la napa bajó (durante la época seca) más de los 20 cm de profundidad son los siguientes: Microcuenca intervenida (seis puntos): BOF0-T02, BOF0-T03; BOF1-T02, BOF1-T03; BOF2-T02, BOF2-T03; microcuenca testigo (seis puntos): BOF3-T01, BOF3-T02, BOF3-T03; BOF4-T03; BOF5-T02, BOF5-T03. De estos, tres puntos salen del rango “regular” (MINAM, 2019b) con una profundidad de la napa freática mayor a los 60 cm en la época seca: BOF0-T02, BOF2-T02, BOF3-T01. Dos de estos puntos de monitoreo (BOF0-T02 y BOF2-T02) se

encuentran en la microcuenca intervenida, en el centro de su respectivo bofedal, y un punto se ubica en la microcuenca testigo en la entrada al respectivo bofedal (BOF3-T01).

Discusión

De las técnicas de S&CA (véase la sección de Métodos) que se han implementado en la microcuenca intervenida en Rontoccocha solo las q’ochas pueden mostrar un impacto a relativamente corto plazo. Por lo tanto, la actual hipótesis es que, gracias a las cinco q’ochas que se habían construido en su parte alta y media (Figura 2), el flujo base en la microcuenca intervenida (Figura 3) nunca ha llegado a 0 l/s durante los periodos de registros. Aún queda como hipótesis, porque desde la instalación del instrumento de

medición del caudal han ocurrido varias temporadas con fallas del respectivo datalogger (véase indicaciones en la Figura 3). Además, no se cuenta con registros continuos del caudal antes de la instalación del sensor de medición en diciembre de 2015. Sin embargo, comuneros de Atumpata comentan que, en los años previos a la construcción de las q'ochas, la quebrada Llantupa se secaba frecuentemente en la época de estiaje.

Del primer análisis de los datos de monitoreo de la napa freática en los seis bofedales, se puede concluir que, según los criterios propuestos por el MINAM (2019a), ninguno de estos seis bofedales se encuentra en un estado muy crítico respecto a su recarga hídrica. Además, se nota que las actuales condiciones de las napas freáticas en los bofedales de la microcuenca intervenida aún no son mejores que aquellas de los bofedales de la microcuenca testigo, a pesar de las intervenciones con técnicas de S&CA. Sin embargo, tampoco se cuenta con una línea de base de las napas freáticas en los bofedales previa a la construcción de las q'ochas, lo que no permite una comparación directa. Finalmente, también es importante destacar que, al parecer, los bofedales de la microcuenca intervenida (BOFO, BOF1 y BOF2) solo están hidrológicamente conectados con dos (Jayllahuasi Baja y Alta) de las cinco q'ochas de la microcuenca, lo que podría causar una mayor demora en la recuperación a través de la recarga hídrica de los bofedales en mención (Figura 1).

Se puede concluir que las intervenciones con S&CA aún no muestran un efecto fácilmente detectable en el caudal de la quebrada Llantupa y tampoco en la recarga (recuperación) hídrica de los bofedales de la misma microcuenca. Se recomienda mantener e inclusive ampliar (p. ej., instalar más tubos de observación en cada bofedal) el SMEH en ambas microcuencas para construir una línea de base más sólida que permitirá conclusiones más nítidas sobre el impacto que tengan las diferentes técnicas de S&CA sobre la ecohidrología de la microcuenca intervenida de Rontoccocha.

Agradecimientos

A la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) por el financiamiento del trabajo de campo, a través del Programa Bosques Andinos (HELVETAS Swiss Intercooperation y CONDESAN). A la ONG local CEDES (Centro de Estudios y Desarrollo Social) por la información entregada sobre Rontoccocha (Augusto Ramírez, Mario Prada, Roberto Mallma y Rubén Mallma) y el apoyo en el trabajo de campo (Benjamín Gutiérrez, Hervin Huancari, Conan Kari y otros). A la SUNASS (Ronald Cervantes y Yésica Quispe), a las comunidades de Atumpata, Micaela Bastidas y Llañucancha, y al grupo de asistentes (Cristhian Álvarez, Juler Arias, Sebastián Baiker, Eliana Bravo, Diana Cáceres, Silvia Cuaquira, Flor de María Huanca, José Luis Huarco, Naysha Kari, Gunther Peña, Nicky Pérez, Jhon Quispe, Ruderson Rivera, Shakira Sánchez, Leonardo Tapia y Yuditza Zevallos) por el apoyo en el trabajo de campo.

Referencias

- Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L. L., Grelik, S. L., Hribljan, J. A., Planas Clarke, A. M., Polk, M. H., Lilleskov, E. A. y Fuentealba, B. (2019). Mapping mountain peatlands and wet meadows using multi-date, multi-sensor remote sensing in the Cordillera Blanca, Peru. *Wetlands*, 39(5), 1057-1067. doi: 10.1007/s13157-019-01134-1
- Cooper, D. J., Wolf, E.C., Colson, C., Vering, W., Granda, A. y Meyer, M. (2010). Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42(1), 19-33. doi: 10.1657/1938-4246-42.1.19
- CTB/ENABEL (Eds.). (2018). Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos. PRODERN – Sistematización y Lecciones Aprendidas, 5. Lima, Cooperación Técnica Belga-CTB / ENABEL.
- Gil-Ríos, J. y De Bièvre, B. (2016). Diseño del sistema de monitoreo hidrológico participativo de los efectos de las prácticas de restauración de humedales - Rontoccocha, Abancay. CONDESAN, CEDES, CTB-PRODERN.
- Gordon, R. P., Lautz, L. K., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Chávez, D. y Baraer, M. (2015). Sources and pathways of stream generation in tropical proglacial valleys of the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Hydrology*, 522, 628-644. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.013
- Imfeld, N., Sedlmeier, K., Gubler, S., Correa Marrou, K., Dávila, C. P., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., Rohrer, M., Scherrer, S. C. y Schwierz, C. (2020). A combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru. *International Journal of Climatology*, 41(1), 679-698. doi: 10.1002/joc.6645
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2018). Resultados definitivos de los Censos Nacionales 2017 - Apurímac. Tomo I. Lima, INEI. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1557/
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2019a). Mapa nacional de ecosistemas del Perú. Memoria descriptiva. Lima, Ministerio del Ambiente. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2019b). Guía de evaluación del estado del ecosistema de bofedal. Lima, Ministerio del Ambiente. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/65954>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J. D., Céleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P. y De Bièvre, B. (2018). High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific Data*, 5, 180080. doi: 10.1038/sdata.2018.80
- Villacorta Chambi, S. P., Peña Laureano, F., Jaimes Salcedo, F., Sosa Senticala, N. L., Condori Quispe, E., Pari Pinto, W., Luza Huillca, C. A. y Rodríguez Morata, C. (2019). Evaluación integral de la cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para la prevención de desastres de origen geológico y geo-hidrológico. *Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 71. Lima, INGEMMET.

Ensayo de Germinación de *Oreocallis grandiflora*, especie de importancia ecológica en los ecosistemas de montaña

Germination test of *Oreocallis grandiflora*, a species of ecological importance in mountain ecosystems

Sandra Arroyo Alfaro^{1*}, Beatriz Fuentealba Durand¹, Herbert Valverde Balabarca¹, Melissa Aranda Depaz¹, Abel Flores Milla¹

¹ Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Huaraz, Perú

* sarroyo@inaigem.gob.pe

Resumen

Los ecosistemas andinos son áreas de gran riqueza de flora y fauna, en donde ocurren diversos procesos de diseminación, germinación y establecimiento de especies. En ciertas zonas degradadas se puede observar agrupaciones de *Oreocallis grandiflora* “chakpá” característica de bosques montanos, matorrales andinos y páramos en la Cordillera de los Andes. Se establece en sucesiones secundarias creciendo como árbol o arbusto que presenta flores y frutos todo el año, proveyendo de recursos energéticos a especies de aves y roedores. Así mismo, contribuye a la conservación y restauración de ecosistemas por sus interacciones de polinización. Sus usos más difundidos son el de leña y para la confección de canastas. Algunos autores señalan que crece asociado con micorrizas del suelo y que la semilla requiere ser previamente remojada en agua. Por la importancia ecológica de esta planta, este estudio busca identificar los sustratos requeridos para la buena germinación y determinar la influencia del pretratamiento de semillas para su buena germinación. La recolección de semillas de *Oreocallis* y suelo con micorrizas se efectuó en el sector Tayacoto de la Comunidad Campesina Cahuide, UH (Unidad Hidrológica) Quillcay, Huaraz. El diseño experimental se instaló en el invernadero del Centro de Investigación Científica y Tecnológica en Ecosistemas de Montaña (CICTEM), ubicado en el Distrito de Catac, Recuay, empleando 220 semillas de 0.02, 0.03 y 0.04 g, distribuidas en cuatro tratamientos por tipo de sustrato (suelo agrícola y suelo con micorrizas) y pretratamiento de semillas (remojo de semillas en agua por 48 horas y sin remojo). La germinación inició a los 24 días de siembra, y después de 42 días se obtuvo mayor porcentaje de germinación en el sustrato con suelo agrícola (sin micorrizas) y semillas previamente remojadas, seguido por el sustrato con micorrizas y sin remojo, siendo mayor en las semillas de 0.03 g. Lo que nos sugiere que para obtener mayor porcentaje de germinación, se puede emplear semillas de 0.03 g y que el suelo con micorrizas favorece la germinación, haciendo innecesario el pretratamiento de semillas.

Palabras clave: Germinación, micorrizas, *Oreocallis grandiflora*

Abstract

Andean ecosystems are areas of great wealth of flora and fauna, where various processes of dissemination, germination and establishment of species occur. In certain degraded areas, groups of *Oreocallis grandiflora* “chakpá” (Quechua Ancashino) can be observed, characteristic of montane forests, Andean scrublands and moors in the Andes. It gets established in secondary successions growing as a tree or shrub that has flowers and fruits all year round, providing energy resources to species of birds and rodents. Likewise, it contributes to the conservation and restoration of ecosystems due to its pollination interactions. Its most widespread uses are for firewood and for making baskets. Some authors point out that it grows associated with soil mycorrhizae and that the seed needs to be previously soaked in water. Due to the ecological importance of this plant, this study seeks to identify the required substrates for good germination and to determine the influence of the seed pretreatment for its germination. The collection of *Oreocallis* seeds and soil with mycorrhizae was carried out in the Tayacoto sector of the rural community off Cahuide in the Quillcay hydrological unit (UH in Spanish). The experimental design was installed in the greenhouse of the Center for Scientific and Technological Research in Mountain Ecosystems (CICTEM), located in the District of Cátac, Recuay, using 220 seeds of 0.02, 0.03 and 0.04 g, distributed in four treatments by type of substrate (agricultural soil and soil with mycorrhizae), and seed pretreatment (soaking seeds in water for 48 hours and without soaking). Germination began 24 days after sowing, and after 42 days a higher percentage of germination was obtained in the substrate with agricultural soil (without mycorrhizae) and previously soaked seeds, followed by the substrate with mycorrhizae and without soaking, being higher in the seeds of 0.03 g. This suggests that to obtain a higher percentage of germination, seeds of 0.03 g can be used and that soil with mycorrhizae favors germination, making unnecessary the pretreatment of seeds.

Keywords: Germination, mycorrhiza, *Oreocallis grandiflora*

Introducción

Entender los procesos relacionados con la regeneración natural, como la dispersión de semillas, la germinación y el establecimiento de nuevas plantas, es indispensable para la adecuada conservación, manejo y recuperación de los bosques de montaña (Weinberger y Ramírez, 2001). Varios aspectos morfológicos (como el tamaño y el peso) y fisiológicos (tipo de dormancia) de las semillas influyen en su capacidad de germinación y en el establecimiento inicial de las plántulas. Pero también se relaciona con los factores ambientales presentes, como temperatura, humedad, nutrientes y luz (Baskin y Baskin, 2014). En general, es poco lo que conocemos de estos procesos y de las condiciones que favorecen la germinación y establecimiento de las especies vegetales de montaña.

La especie *Oreocallis grandiflora*, conocida comúnmente como “chakpá”, se encuentra en forma natural en valles interandinos con buen nivel de humedad ambiental y sin heladas, como los de Apurímac, Mantaro, Callejón de Huaylas y los Conchucos, así como en vertientes orientales, desde 1000 a 3800 m s.n.m. Se la encuentra creciendo en grupo en zonas de sucesión secundaria, creciendo como árbol o arbusto, y presenta flores y frutos durante todo el año, lo que es un importante alimento para especies de aves y roedores, además de contribuir a la conservación de diversos polinizadores. Esta es una planta a la que tradicionalmente se le han dado muchos usos, en el Callejón de Huaylas se usaba para la confección de canastas, aprovechando que esta especie rebrota con vigor. En algunos viveros, utilizan el chakpá para hacer tinglados, por su rusticidad, sistema radicular y aporte de hojarasca al suelo. Asimismo, es una buena especie para la protección de laderas. En Cajamarca, las flores en infusión se usan para el alivio de resfríos. Debido a su aprovechamiento irracional y la falta de impulso para favorecer su propagación, en muchas zonas de la

sierra peruana, es una especie muy poco común (Pretell Chiclote et al., 1985).

Pretell Chiclote et al. (1985) señalan que, debido a la pobre capacidad de enraizamiento de las estacas de *O. grandiflora*, la mejor forma de propagarlo es a partir de semilla. Ellos sugieren el uso de tierra superficial proveniente de árboles de chakpá, por la presencia de un agente simbiote en su sistema radicular. Asimismo, proponen sumergir la semilla en agua durante unas 48 horas, para acelerar el proceso de germinación. Debido a la importancia ecológica de chakpá, este estudio busca poner a prueba las recomendaciones Pretell Chiclote et al. (1985), al comparar sustratos y pretratamientos en el proceso de germinación y establecimiento de semillas de chakpá.

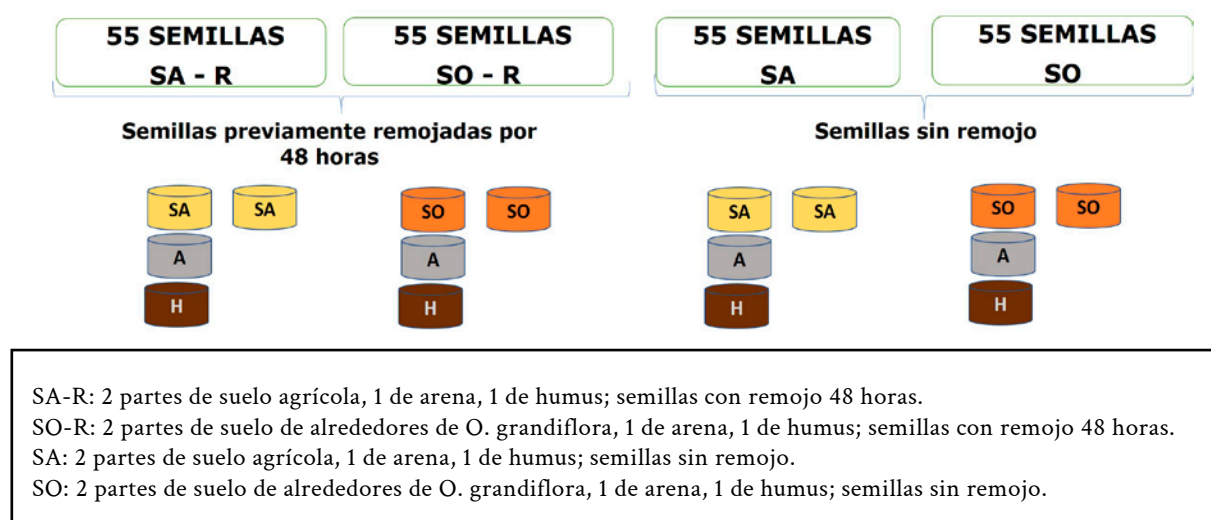
Metodología

Recolección de Frutos y Selección de Semillas

Los frutos de *O. grandiflora* son folículos alargados, lignificados, de 10-15 cm de longitud. Tienen una apertura en la zona ventral por la que exponen las semillas al viento. Los frutos fueron recolectados cuando la coloración era marrón en el sector Tayacoto (Huaraz, Ancash), entre los meses de abril y mayo del 2019. En gabinete, se seleccionaron 220 semillas, clasificándolas por pesos de 0.02, 0.03 y 0.04 g, usando una balanza electrónica (Henkel) de precisión 0.01 g.

Tratamientos

Para la siembra, se definieron tratamientos según tipo de sustrato: suelo agrícola o suelo superficial proveniente de plantas adultas de *O. grandiflora*, y según pretratamiento: semillas remojadas por 48 horas y sin remojo, resultando en cuatro tratamientos. El peso de la semilla se tomó como una covariable (Figura 1).



Clave: SA - Suelo agrícola, SO - Suelo de *Oreocallis*, A - Arena, H - Humus

Figura 1. Tratamientos del ensayo de germinación de *Oreocallis grandiflora*. Fuente: Elaboración propia

El suelo superficial de plantas de *O. grandiflora* fue recolectado hasta 10 cm de profundidad en el sector Tayacoto (Huaraz, Ancash), en un radio de 50 cm alrededor del tallo de plantas de *O. grandiflora*, y en el invernadero fue tamizado. La arena y la tierra agrícola utilizadas fueron desinfectadas realizando lavados con agua a 100 °C.

La siembra se realizó el 28 de agosto de 2019, en el invernadero del Centro de Investigación Científica y Tecnológica en Ecosistemas de Montaña (CICTEM) del INAIGEM, ubicado en Cátac (UTM 236582 E, 8906375 N; 3800 m s.n.m), en bandejas de polietileno de 28 celdas, colocando una semilla por celda. Las bandejas se cubrieron con malla Raschel de 50% de sombra y el riego fue diario.

La evaluación de la germinación se realizó diariamente, excepto fines de semana, registrando la fecha en que emergía cada plántula del sustrato y, desde que tuvieron los cotiledones extendidos, se evaluó la altura semanalmente.

Análisis de Datos

Los datos registrados por cada tratamiento se analizaron para obtener el número de semillas germinadas por día y así obtener la germinación acumulativa, entre el día 0 y 72 días desde la siembra. El porcentaje de semillas germinadas en cada fecha se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ semillas germinadas} = (N_i) / N_t \times 100$$

En donde:

N_i = Número de semillas germinadas en el día i
 N_t = Número total de semillas

Asimismo, se analizó el porcentaje de germinación según el peso de cada semilla, comparándolo entre tratamientos. Finalmente, se realizó la comparación de la tasa de crecimiento en altura de las plántulas, según tipo de sustrato, usando los datos en milímetros obtenidos el día 20 de noviembre del 2019 (casi tres meses después de la siembra). La tasa de crecimiento se estima como la pendiente de la línea de regresión generada (altura en mm vs. edad en días) por las plántulas creciendo en cada tipo de sustrato.

Resultados y Discusión

La germinación de las semillas de *O. grandiflora* inició a los 24 días de siembra, y se evaluó hasta el día 73. No se encontraron diferencias entre tratamientos en el porcentaje de germinación total, pero en el sustrato con suelo agrícola y sin pretratamiento de semillas (SA) tuvo una germinación más lenta (Figura 2). Esto puede relacionarse con la menor capacidad del suelo agrícola (SA) de retener humedad, lo que habría sido compensado por el remojo de 48 horas en el tratamiento SA-R.

Reynel y Marcelo (2009) indican que esta especie no tiene dormancia y germina rápidamente; inicia entre los 5 y 15 días y finaliza en un máximo de 25 días, y presenta un poder germinativo alto (entre 90 al 97%). Sin embargo, otros estudios encuentran porcentajes de germinación entre 43% y 91% (Palomeque et al., 2017). Nuestros resultados son intermedios, mostrando un buen poder germinativo, entre 84 y 93%, pero con mayor tiempo para alcanzar estos valores (la germinación inicia el día 24 y se prolonga hasta el día 73).

De acuerdo con Goor y Barney (1976), las semillas más grandes poseen mayores reservas nutricionales. Rivera Lazo (2019) menciona que, para *O. grandiflora*, los

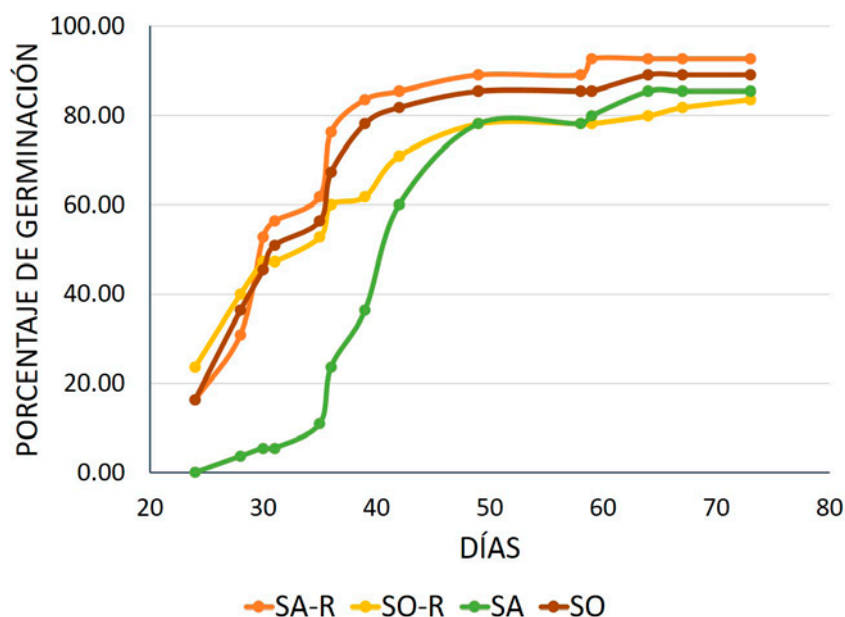


Figura 2. Porcentaje de germinación por días en los tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

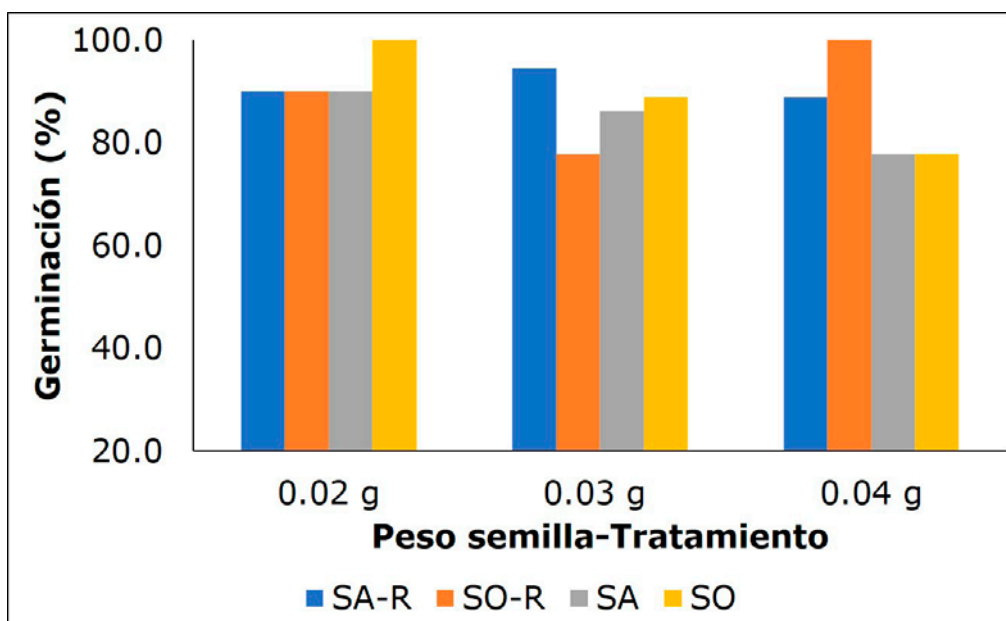


Figura 3. Porcentaje de germinación de *O. grandiflora* por peso de semillas en los tratamientos a los 73 días de siembra. Fuente: Elaboración propia.

valores de peso, pureza y contenido de humedad influyen directamente en el porcentaje germinativo de la semilla madura. Sin embargo, nuestros resultados no muestran ninguna diferencia evidente relacionada con el peso de la semilla (Figura 3). En los diferentes tratamientos se obtuvieron porcentajes superiores al 77.8% en casi todos los casos. Esto nos indicaría que un peso de 0.02 g es un factor importante para la selección de semillas viables, lo cual debería confirmarse con un estudio más detallado de los pesos de las semillas y estudios de viabilidad.

Un análisis preliminar de los datos nos muestra que las plántulas germinadas en suelo superficial de plantas de

O. grandiflora tienen una mayor tasa de crecimiento que aquellas que crecen en suelo agrícola (Figura 4). Tanto Pretell Chiclote et al. (1985) como Reynel et al. (2006) mencionan que la tierra donde crece el chakpá presenta micorrizas (un agente simbiote del sistema radicular de esta especie), lo que explicaría estas diferencias en el crecimiento. Asimismo, análisis realizados en áreas con arbustos de *O. grandiflora* determinaron la presencia de endoectomicorrizas (Ríos Chamba y Acevedo Carrión, 2007). Según Maldonado y Ramírez (1997), los beneficios que producen las micorrizas son la base fundamental que le permite a la planta una mejor nutrición, crecimiento y adaptación al medio, en comparación con las plantas sin micorrizas.

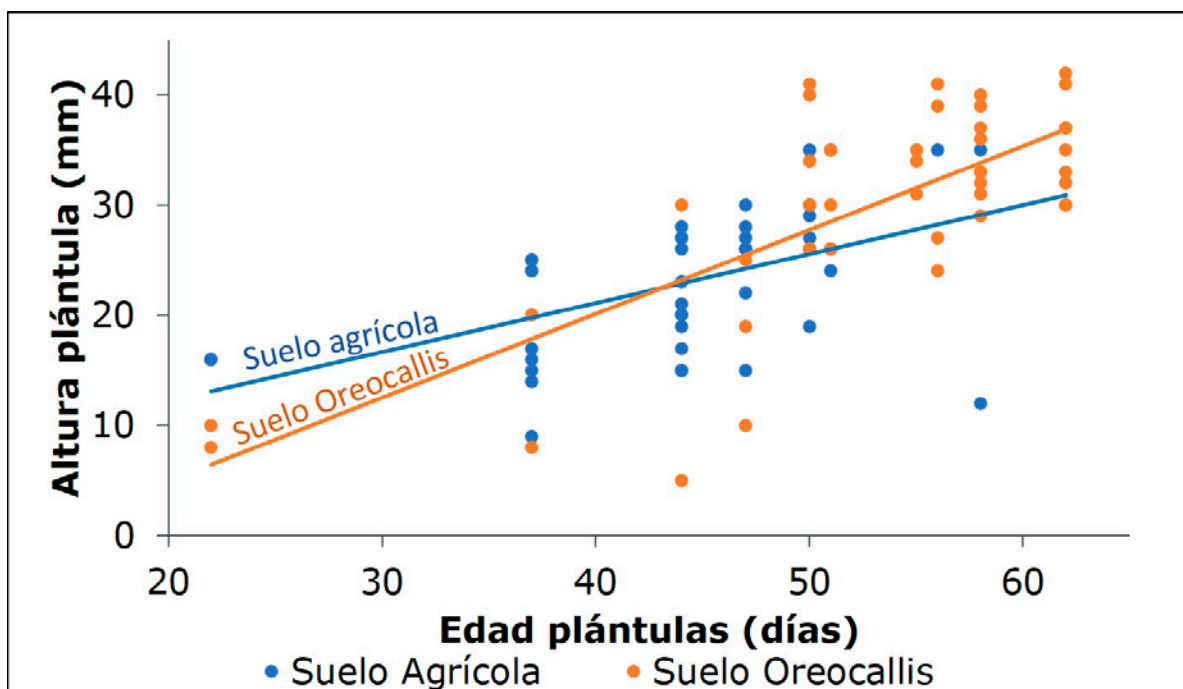


Figura 4. Altura de las plántulas de *O. grandiflora* según edad y sustrato. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Plántula de *O. grandiflora* con sus cotiledones. Foto: Los autores.

Conclusiones

La germinación de *Oreocallis grandiflora* (Figura 5) fue más lenta que lo reportado por otros autores, iniciando a los 24 días de siembra y extendiéndose hasta los 72 días. El porcentaje total de germinación estuvo entre 84% y 93%, siendo similar entre tratamientos, aunque germinación fue más lenta en el tratamiento con suelo agrícola y sin remojo (SA). Esto podría indicar la importancia del pretratamiento de semillas para los sustratos que no retengan suficiente humedad.

No se encontró un efecto del peso de la semilla en la capacidad de germinación, tal vez porque las semillas a partir de 0.02 g presentan un alto porcentaje de viabilidad, pero se requieren más estudios al respecto para confirmar este factor.

El crecimiento de las plántulas ha sido mayor en el sustrato con suelo de alrededores de *O. grandiflora* (SO) comparado con el crecimiento de plántulas en el sustrato con suelo agrícola (SA). Esto se puede relacionar con la presencia de micorrizas, reportada por otros autores, lo que beneficiaría el crecimiento y desarrollo de esta especie.

Referencias

Baskin, C. C. y Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination* (2nd ed.). Elsevier Science.

Goor, A. Y. y Barney, C. W. (1976). *Forest tree planting in arid zones* (2nd ed.). Nueva York, Ronald Press.

Maldonado, J. M. y Ramírez, G. A. (1997). Efecto de la inoculación con hongos micorrizógenos en almácigos de café

(Coffea arábica) Variedad Colombia. Tesis. Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia.

Palomeque, X., Maza, A., Ñamagua, J. P., Günter, S., Hildebrandt, P., Weber, M. y Stimm, B. (2017). Variabilidad intraespecífica en la calidad de semillas de especies forestales nativas en bosques montanos del sur de Ecuador: Implicaciones para la restauración de bosques. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 52-72.

Pretell Chicote, J., Ocaña Vidal, D., Jon Llap, R. y Barahona Chura, E. (1985). *Apuntes sobre algunas especies forestales nativas de la Sierra Peruana*. Proyecto FAO/Holanda/INFUR, Lima.

Reynel, C., y Marcelo, J. (2009). *Árboles de los ecosistemas forestales andinos. Manual de identificación de especies. Serie Investigación y Sistematización N° 9*. Lima, Programa Regional ECOBONO-INTERCOOPERACIÓN.

Reynel, C., Pennington, T. D., Pennington, R. T., Marcelo, J. L. y Daza, A. (2006). *Árboles útiles del Ande peruano: Una guía de identificación, ecología y propagación de las especies de la sierra y los bosques montanos del Perú*. Lima, Tarea Gráfica Educativa.

Ríos Chamba, L. F. y Acevedo Carrión, G. O. (2007). *Ecología, utilización e impactos producidos por el aprovechamiento del cucharillo Oreocallis grandiflora (Lam.) R. Br. en las parroquias de Taquil, Chantaco, Chuquiribamba y Gualel de la provincia de Loja*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

Rivera Lazo, D. R. (2019). *Germinación de semillas y crecimiento inicial de cuatro especies forestales nativas del bosque de Nero, Provincia del Azuay*. Tesis de grado. Universidad de Cuenca, Ecuador.

Weinberger, P. y Ramírez, C. (2001). Microclima y regeneración natural de Raulí, Roble y Coigüe (*Nothofagus alpina*, *N. obliqua* y *N. dombeyi*). *Bosque*, 22(1), 11-26. doi:10.4206/bosque.2001.v22n1-02

Evaluación de las Causas de Degradación y Alternativas de Recuperación del Pastizal de Acocancha, Comunidad Campesina Cordillera Blanca, Distrito y Provincia de RECUAY

Evaluation of the Causes of Degradation and the Recovery Alternatives of the Acocancha Grassland, in the Peasant Community Cordillera Blanca, District and Province of Recuay

Angel Antonio Mendoza Granados^{1*}

¹ Consultor, Instituto de Montaña, Huaraz

*amendoza.gra@gmail.com

Resumen

El objetivo de la investigación es identificar las causas de degradación del pastizal de Acocancha (40 ha), donde los pastos para el ganado vacuno han disminuido a la par que han aumentado especies indeseables como *Juncus ebracteatus* ("Jueb") y *Juncus arcticus* var. *andicola* ("Juar").

Se realizó una zonificación con un GPS de acuerdo con la vegetación dominante (Jueb, Juar y pastos) en 13 sitios establecidos según zonificación y pendiente. Se evaluó lo siguiente: composición y abundancia florística (transecto de Parker modificado), porcentaje de vegetación, profundidad y compactación del suelo, y cambios en el nivel de la napa freática. Se hicieron tres calicatas para ver el perfil del suelo, y entrevistas a los pastores del ganado y a los miembros de la comunidad para identificar los principales cambios en el manejo del pastizal.

Los sitios de pastos tienen una buena condición (puntaje 70.19), mientras que los sitios de juncos (Jueb y Juar) muestran degradación (regular y pobre). La napa freática de estos últimos fue más superficial (10 cm) que en los sitios de pastos (41.4 cm). Se confirmó que las especies de juncos se desarrollan más en áreas de mayor humedad en el suelo. En el área del pastizal existe una capa de arcilla que reduce el drenaje del agua, lo cual origina la inundación del suelo y genera un ambiente favorable para el incremento de las juncáceas y la degradación del pastizal. Las entrevistas muestran que el manejo inadecuado del agua (zanjas de drenaje y zanjales de infiltración) provocó el aumento de los juncos. En conclusión, el estado de salud del pastizal se ha deteriorado (45% de juncos, de acuerdo a zonificación) con una condición de regular a pobre, cuya causa principal es el exceso de agua por el manejo inadecuado.

Palabras clave: *Juncus ebracteatus*, *Juncus arcticus*, nivel de napa freática

Abstract

The objective of this research is to identify the causes of degradation of the Acocancha grassland (40 ha), where grasses suitable for cattle have decreased while undesirable species, rushes such as *Juncus ebracteatus* ("Jueb") and *Juncus arcticus* var. *andicola* ("Juar"), have increased.

A zonification was carried out with a GPS according to the dominant vegetation (Jueb, Juar and grasses) in 13 sites established according to zoning and slope. The following were evaluated: composition and floristic abundance (modified Parker transect), percentage of vegetation, depth and compaction of the soil, and changes in the level of the water table. Three pits were made to see the soil profile, and interviews were conducted with cattle herders and members of the community to identify the main changes in pasture management.

The pasture grass sites are in good condition (score 70.19), while the rush-dominated sites (Jueb and Juar) show degradation (fair and poor). The water table of the latter was shallower (10 cm) than in the pasture grass sites (41.4 cm). It was confirmed that rush species develop more in areas of higher soil moisture. In the grassland area there is a layer of clay that reduces water drainage, which causes soil flooding and creates a favorable environment for the increase of rushes and degradation of grassland. Interviews show that inadequate water management (drainage ditches and infiltration ditches) caused the increase in rushes. In conclusion, the state of health of the grassland has deteriorated (45% rushes, according to zoning) with a fair to poor condition, whose main cause is excess water due to inadequate management.

Keywords: *Juncus ebracteatus*, *Juncus arcticus*, water table level

Introducción

Los pastos naturales son la base de la alimentación en muchos sistemas ganaderos, por lo que su degradación y la pérdida de forraje son un problema fundamental y de interés mundial. En el caso de la región andina del Perú, la vegetación de las praderas altoandinas (3800 a 4400 m s.n.m.) es representada por las gramíneas perennes que son el hábitat del 80% de vacunos y el 98% de ovinos. De estas praderas pastoreadas, el 80% presenta una condición de regular a muy pobre, lo que indica la necesidad de prestar mayor atención para su conservación (Florez, 2005; Alegría, 2013).

La comunidad campesina Cordillera Blanca (Recuay, Ancash, Perú) posee extensas áreas de pastos naturales, con alrededor del 70% de su superficie total en los sectores de Cotucancha, Shillacancha, Arhuaycancha y Acocancha, donde se desarrollan actividades ganaderas. En el sector Acocancha, se observa una degradación del pastizal (pérdida de pastos agradables) que afecta directamente a la producción del ganado vacuno y, como consecuencia, a la producción de leche y carne. Esta pérdida posiblemente se debe al sobrepastoreo (manejo inadecuado del ganado), a la compactación del suelo por pisoteo, al exceso y/o inadecuado manejo del agua de riego, y a otros factores.

Ante esta situación, varios representantes de la comunidad pidieron apoyo al Instituto de Montaña en Huaraz. Como parte del proyecto “Innovación por contexto e innovación por demanda para favorecer el manejo adaptativo de la puna y el desarrollo de las comunidades campesinas de la Cordillera Blanca, Perú”, realicé esta investigación con el objetivo de identificar las causas de la degradación de los pastizales de Acocancha de la comunidad campesina Cordillera Blanca y proponer alternativas para su recuperación.

Pastizales Altoandinos

Los pastizales son “cualquier área en la que se produce plantas para el forraje: gramíneas, graminoides, leguminosas, arbustos ramoneables, hierbas o mezclas de estas” (Florez, 2005, p. 5). Se llaman altoandinos cuando se encuentran sobre los 3800 a 4000 m s.n.m., donde la precipitación es escasa y con fuertes heladas entre los meses de abril a setiembre (Florez, 2005; CONATURA, 2004).

Clasificación Funcional

Esta clasificación determina el grado de deseabilidad que tienen las diferentes plantas por los animales domésticos. Para este caso, es importante conocer la deseabilidad para el ganado vacuno.

Especies Deseables (D)

Plantas que son agradables durante todo el año y forman parte de la dieta de los animales. Se encuentran

en campos de buena condición, son perennes y tienen sistemas radiculares profundos. También están incluidas plantas deliciosas que son las más agradables, pero raras. Cuando hay mayor presión de pastoreo empieza a disminuir su población.

Especies Poco Deseables (PD)

Son especies de importancia secundaria en campos de buena condición, menos agradables que las deseables. Ellas reemplazan a las especies deseables cuando disminuye la condición del campo y reemplazan a las especies indeseables cuando mejora la condición del campo.

Especies Indeseables (I)

Son las más pobres y abundan en campos sobrepastoreados y mal manejados. Están constituidas casi en su totalidad por plantas invasoras, tóxicas, duras y espinosas, que no son consumidas por el ganado en ninguna época del año, y que reemplazan a las especies deseables y poco deseables cuando la condición del campo es muy pobre.

Clasificación Taxonómica

Las especies se agrupan en más de 20 familias identificadas, en las que dominan las familias de Poaceae (29%) y Asteraceae (25%), y en menor proporción las familias de Fabaceae (5%), Juncaceae (3%), Rosaceae, Cyperaceae (4%) y otras.

Degradación de Pastizales

Según Ráez (2011, pp. 35-36), cuatro son los procesos que conducen a la degradación y la pérdida de los ecosistemas naturales y sus servicios: la transformación de hábitats, la explotación excesiva de un recurso renovable más allá de su capacidad de renovación, la introducción de especies invasoras y la contaminación con nutrientes excesivos.

Lugar de Estudio: Acocancha

El sector de Acocancha se encuentra en la parte baja de la comunidad campesina Cordillera Blanca, alrededor de los 3600 m s.n.m. El área usada como pastizal, de 39.98 ha, está rodeada por bosques de eucalipto y pino (véase Figura 1).

El sector de Acocancha es de mucha importancia a nivel comunal, porque allí se cría el ganado comunal del que se extrae leche diariamente durante todo el año. En el pastizal, la comunidad cuenta con aproximadamente 30 vacunos, de los cuales unos 10 a 15 son vacas lecheras que producen de 40 a 50 litros diarios de leche. Estos vacunos tienen cierto nivel de mejoramiento genético por cruzamiento con vacunos de la raza Brown Swiss.

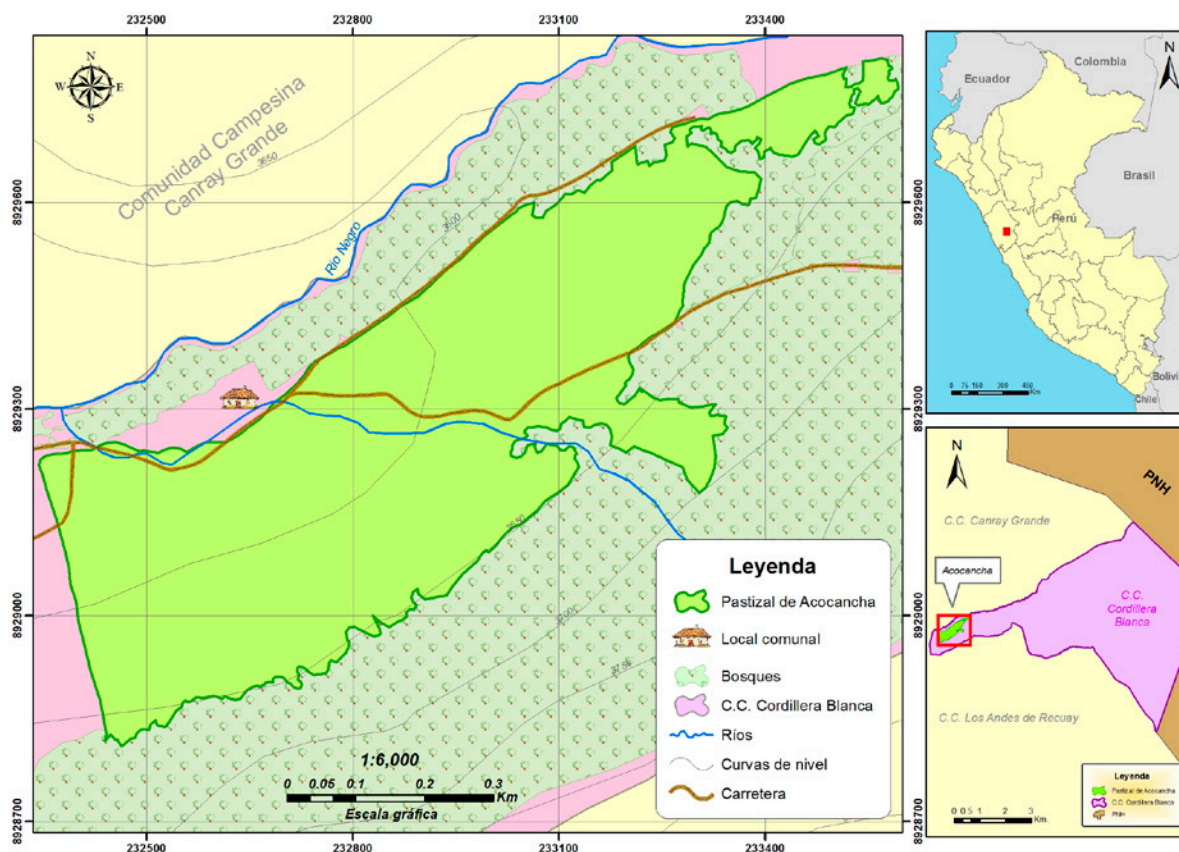


Figura 1. Mapa de la ubicación del pastizal de Acocancha dentro de la comunidad campesina Cordillera Blanca.

Especies Dominantes en el Pastizal de Acocancha

Festuca dolichophylla

Llamada localmente “cachi”, es una especie de la familia Poaceae que se desarrolla hasta los 4300 m s.n.m., y crece en suelos profundos, algo húmedos, en pastizales tipo pajonal. Es una planta perenne, amacollada, de 50 a 100 cm de altura, con inflorescencia en panícula, espiguilla multiflora. Es deseable para llamas y vacunos, pero poco deseable para ovinos y alpacas (Tapia y Flores, 1984).

Juncus arcticus var. *andicola* (designado “Juar” para este estudio)

Llamada localmente “ututo”, es una hierba perenne de 20 a 170 cm de altura. Tiene rizoma de 2.5 a 10 mm de diámetro, ramificado, pero con largos segmentos no ramificados. Tiene entrenudos muy cortos o más frecuentemente de hasta 4 cm de largo, con inserción de los culmos; en consecuencia, son apiñados o espaciados, a veces con una parte rastrera con entrenudos largos y ramas laterales con entrenudos cortos. Tiene una inflorescencia pseudolateral de 20 floraciones múltiples, generalmente laxa y luego de hasta 15 x 10 cm, a veces congestionada y solo de 2 x 2 cm. Esta planta muestra mucha variación ecológica (Balslev y Zuluaga, 2009).

Juncus ebracteatus (designado “Jueb” para este estudio)

Llamada localmente “ututillo”, es una hierba perenne de 15 a 30 cm de alto, con rizomas estoloníferos de 1-2.5 mm de diámetro, desnudos o con pocas escamas membranáceas, de color castaño pálido, de hasta 5 mm de largo. Se encuentra en elevaciones entre 1800-3200 m s.n.m., en terrenos mal drenados a la orilla de presas, canales, arroyos, lagos y lagunas, localizados en zonas con pastizales o en sitios abiertos de diferentes tipos de bosques. Se distribuye en Sudamérica en los Andes desde Perú hasta Bolivia (Balslev y Duno, 2015). En el caso de Acocancha, la encontramos a 3600 m de altitud.

Metodología

Para la investigación, se delimitó la zonificación de acuerdo a la vegetación dominante (Jueb, Juar y Pasto) con la ayuda de un GPS (Figuras 2 y 3). Se verificó la caracterización en 13 sitios establecidos de acuerdo al mapa de zonificación y pendientes, donde se evaluó la composición y abundancia florística (con la ayuda de una wincha y un anillo censador), la profundidad del suelo y la compactación (esta última con la ayuda del penetrómetro y mediante la evaluación de la densidad aparente), los cambios mensuales en el nivel de la napa freática (piezómetros instalados en los 13 sitios de evaluación), y la pendiente (con el aplicativo “Clinómetro”, cuyo



Figura 2. Tipos de vegetación dominante en el pastizal de Acocancha.

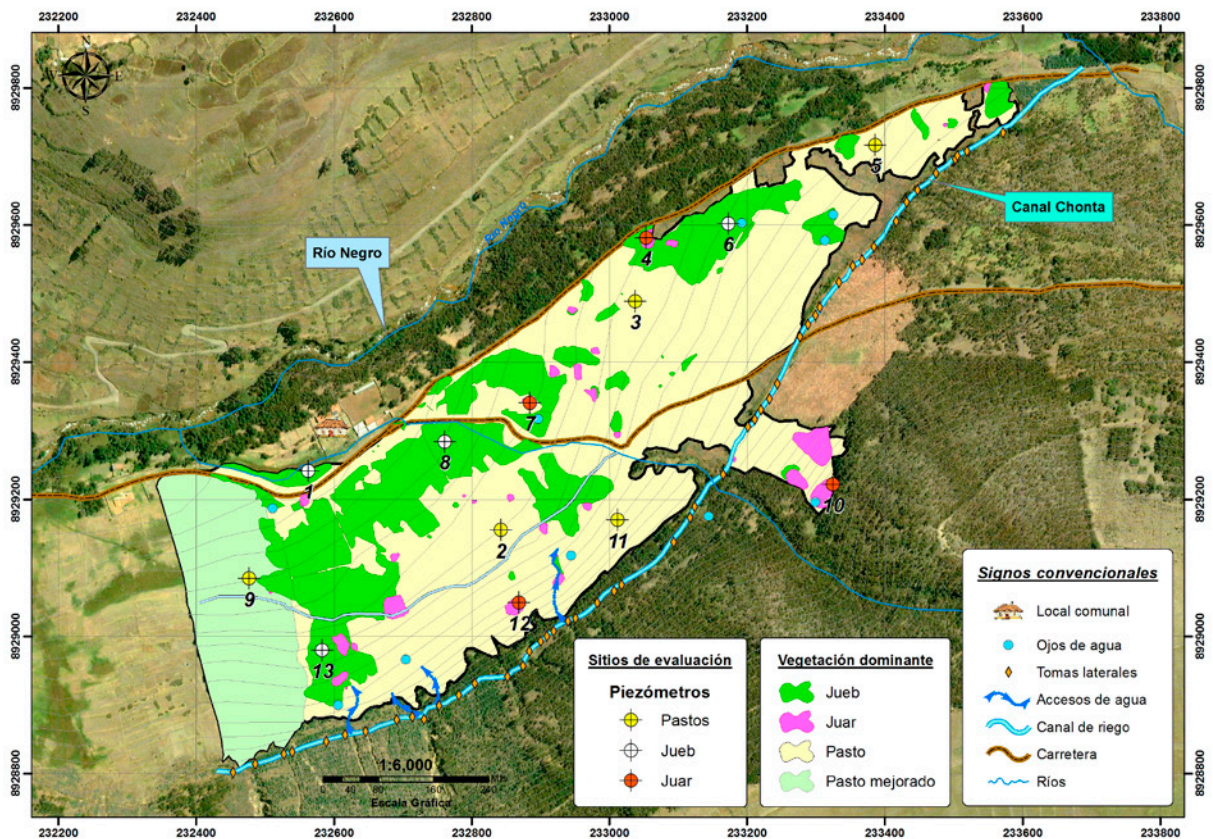


Figura 3. Zonificación del pastizal por la vegetación predominante.

resultado fue contrastado con el mapa de pendientes). También se hicieron tres calicatas para ver el perfil del suelo. Asimismo, se entrevistó a los pastores del ganado de la comunidad y a varios miembros de la comunidad para identificar los principales cambios en el manejo del pastizal en los últimos veinte años, incluyendo formas de riego, la existencia de zanjas de infiltración y drenaje, el incremento del Jueb, el tipo de pastos, las formas de pastoreo y el uso de suelos.

Resultados y Discusión

Se trazó el mapa de zonificación, donde los juncos representan el 45.32% del área del pastizal (Figura 3). La caracterización muestra que los sitios dominados por pastos tienen una buena condición (puntaje 70.19), mientras que los sitios dominados por los juncos (Jueb y Juar) muestran degradación (regular y pobre), con

puntajes de 53.07 y 34.2, respectivamente (Tabla 1). En estos últimos, la napa freática fue más superficial (10 cm en promedio) que en los sitios dominados por pastos (41.4 cm, en promedio) (véase Figura 4). Se encontró una relación directa y significativa ($R^2 = 0.53$, $p < 0.05$) entre el nivel promedio de la napa freática por sitios de evaluación y la abundancia de juncos (Figura 5), confirmando que estas especies se desarrollan más en áreas de mayor humedad en el suelo. Se encontró también que en sitios con suelos profundos existe una capa de arcilla, lo que reduce el drenaje del agua, inundando el suelo y generando un ambiente favorable para el incremento de las juncáceas y la degradación del pastizal. A través de las entrevistas, se pudo encontrar que el manejo inadecuado del agua (falta de mantenimiento de zanjas de drenaje y construcción de zanjas de infiltración sin estudios previos) provocó el aumento de los juncos.

Tabla 1. Características promedio por tipo de vegetación dominante.

Vegetación dominante	Pendiente (°)	% Deseables	% Poco deseables	Especies dominantes	Condición	Densidad aparente (g/cm ³)
Pastos	7.6	46.53	38.50	7 especies: Fedo (40.9%) y Caec (12.8%)	70.19 (Bueno)	0.83
Jueb	4.0	14.53	69.01	7 especies: Jueb (40.6%) y Antod (9.1%)	53.07 (Regular)	0.23
Juar	4.9	9.05	10.29	7 especies: Juar (67.6%)	34.27 (Pobre)	0.26

Nota: Las abreviaturas de especies son Fedo (*Festuca dolichophylla*), Caec (*Carex ecuadorica*), Jueb (*Juncus ebracteatus*), Juar (*Juncus arcticus* var. *andicola*) y Antod (*Anthoxanthum odoratum*).

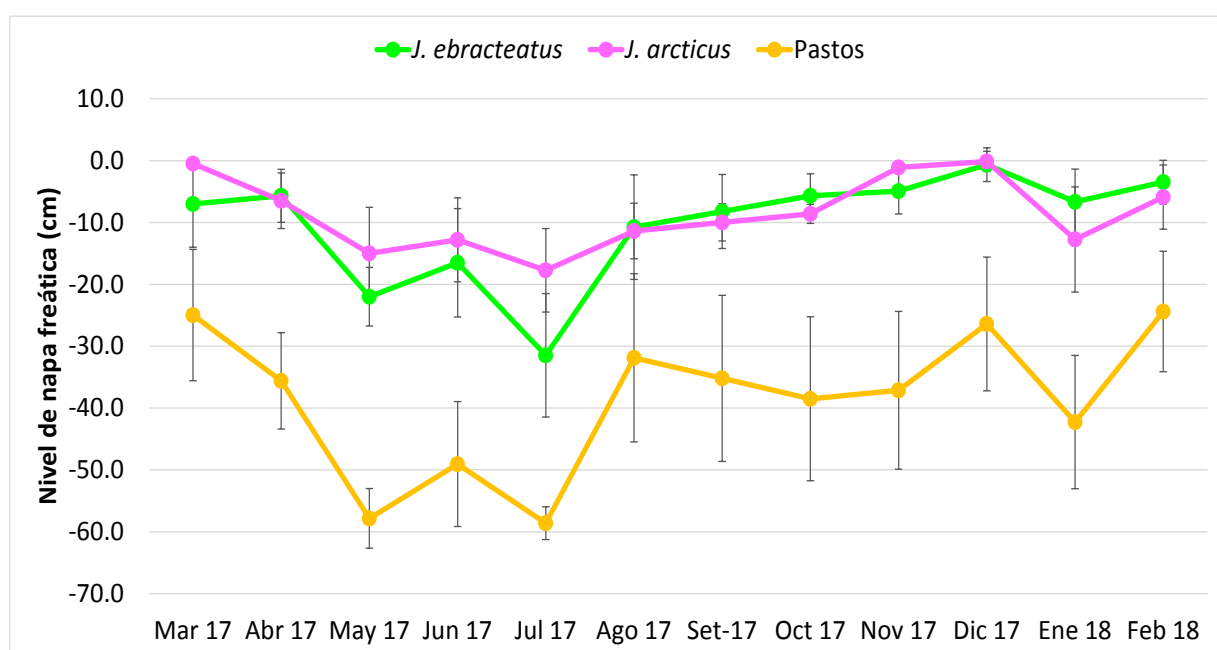


Figura 4. Promedio del nivel de la napa freática por la vegetación dominante.

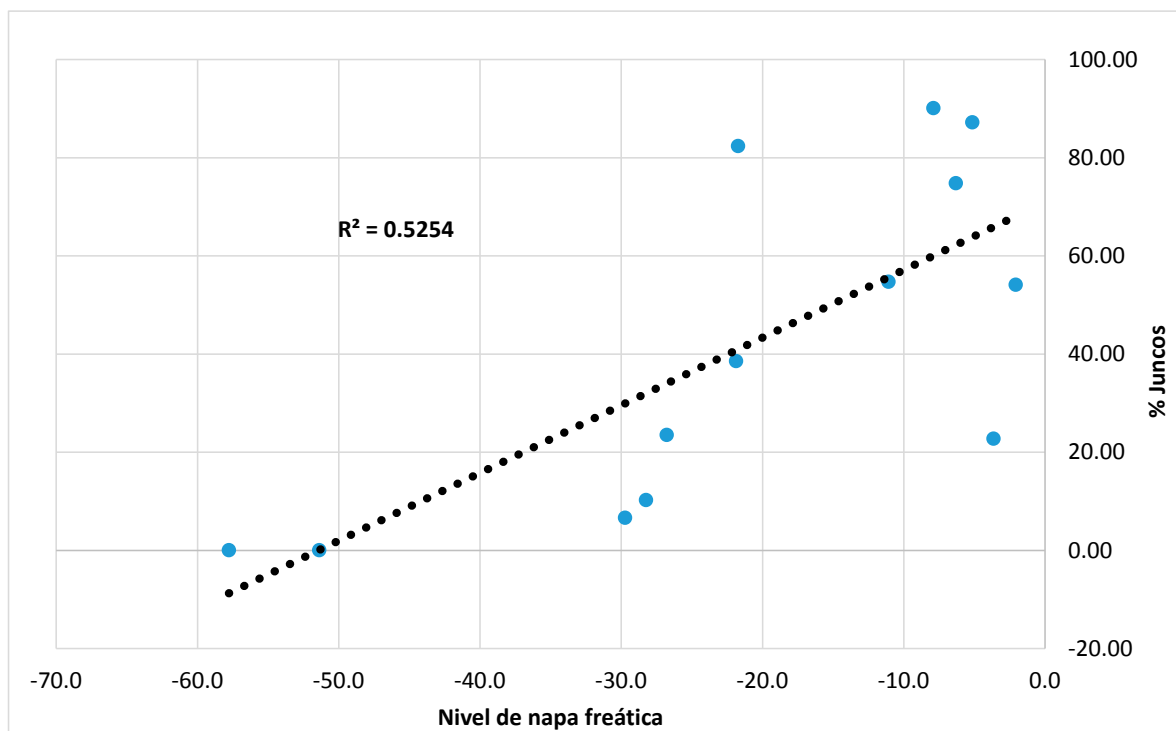


Figura 5. Nivel de la napa freática en comparación con el porcentaje de juncos. vegetación dominante.

Conclusiones

Los resultados demuestran que el estado de salud del pastizal se ha deteriorado (degradado). De acuerdo a la zonificación, se puede apreciar que el pastizal tiene una presencia de más del 30% de especies indeseables (45% Jueb y Juar) que indican degradación (Alejo et al., 2014), quedando solamente un 55% de pastos agradables o deseables para el ganado. En la caracterización se encontró que en los sitios dominados por Jueb y Juar la condición del pasto es de regular y pobre, con bajos porcentajes de especies deseables, 14.53% y 9.05%, respectivamente.

La principal causa de la degradación del pastizal es la saturación de agua (nivel de napa freática promedio en sitios de juncos a 10 cm de profundidad) por el mal drenaje del suelo (capa de arcilla a 40 cm de profundidad y falta de mantenimiento de las zanjas de drenaje), riego por inundación y existencia de zanjas de infiltración (construidas en 2008), las cuales no dejan que el agua salga con rapidez del pastizal, por lo cual el ecosistema está anegado.

Agradecimientos

A la Fundación McKnight por la beca otorgada para el desarrollo de la tesis (Mendoza Granados, 2019) en que este artículo está basado, a través del proyecto “Innovación por contexto e innovación por demanda para favorecer el manejo adaptativo de la puna y el desarrollo de las comunidades campesinas de la Cordillera Blanca, Perú”, ejecutado por el Instituto de Montaña. Al Instituto de Montaña por la oportunidad brindada para realizar la investigación.

Referencias

- Alegría Velásquez, F. (2013). Inventario y uso sostenible de pastizales en la zona colindante a los depósitos de relavera de Ocroyoc-Comunidad de San Antonio de Rancas-Pasco. Tesis de maestría. Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Balslev H. y Duno de Stefano, R. (2015) La familia Juncaceae en México. *Acta Botanica Mexicana*, 111, 61-164.
- Balslev, H. y Zuluaga, A. (2009). Juncaceae. *Flora de Colombia*, 26. Bogotá, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- CONATURA. (2004). Manual de gestión ambiental de la vicuña. Arequipa, Asociación para la Investigación y Conservación de la Naturaleza (CONATURA).
- Florez Martínez, A. (2005). Manual de pastos y forrajes altoandinos. Lima, ITDGA y OIKOS.
- Mendoza Granados, A. (2019). Evaluación de las causas de degradación y alternativas de recuperación de los pastizales de Acocancha – comunidad campesina Cordillera Blanca, distrito y provincia de Recuay, 2017. Tesis de título profesional. Huaraz, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Ráez Luna, E. (2011). La sostenibilidad ambiental en la transición hacia el post extractivismo en el Perú. En A. Alayza y E. Gudynas (Eds.), *Transiciones: Postextractivismo y alternativas al extractivismo en el Perú* (pp. 31-57). Lima, Red Peruana por una Globalización con Equidad (RedGE) y Centro Peruano de Estudios Sociales (CEPES).
- Tapia Núñez, M. E. y Flores Ochoa, J. A. (1984). Pastoreo y pastizales de los Andes del sur del Perú. Lima, Instituto Nacional de Investigación y Promoción Agropecuaria.

TEPUI-SAT: Environmental monitoring and simulation system for cultivation of vulnerable tropical montane wetland flora species

TEPUI-SAT: Sistema de monitoreo y simulación ambiental para el cultivo de especies vulnerables de flora de humedales montaños tropicales

Mateusz Wrazidlo¹, Judith Rosales²

¹ Department of Fundamentals of Machinery Design, Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology, matwraz@gmail.com

² Faculty of Earth & Environmental Sciences, University of Guyana, judith.rosales@uog.edu.gy

Abstract

Tepui-Sat is focused on the development of an innovative methodology for botanical and environmental research over endemic flora habitats of the montane refugia, enabling carrying out long-term monitoring over a wide spectrum of environmental phenomena. It presents a first of its kind methodology for directly transferring the in situ work results into ex situ nature conservation & research undertakings. The system will be a combination of two autonomous units: FloraLink Field Probe – an environmental probe designed to acquire, store and transmit environmental data from the field, and FloraCube – an environmental chamber designed to cultivate vulnerable species of flora in enclosure, capable of simulating specified environmental characteristics.

Keywords: *Horticulture, plant cultivation, Pantepui, Guiana Highlands, environmental monitoring & simulation*

Resumen

Tepui-Sat se centra en el desarrollo de una metodología innovadora para la investigación botánica y ambiental sobre los hábitats de flora endémica de los refugios montañosos, que permite llevar a cabo un seguimiento a largo plazo de un amplio espectro de fenómenos ambientales. Presenta una metodología pionera en su tipo para transferir directamente los resultados del trabajo in situ a proyectos de investigación y conservación de la naturaleza ex situ. El sistema será una combinación de dos unidades autónomas: FloraLink Field Probe, una sonda ambiental diseñada para adquirir, almacenar y transmitir datos ambientales del campo, y FloraCube, una cámara ambiental diseñada para cultivar especies vulnerables de flora en recinto, capaz de simular características ambientales especificadas.

Palabras clave: *Horticultura, cultivo de plantas, Pantepui, Tierras Altas de Guayana, monitoreo y simulación ambiental*

Introduction

Climatic disruptions, global warming, global deforestation and habitat loss are some of the biggest challenges mankind faces in the modern times. These threats jeopardize all efforts to tackle the massive decline in wildlife and imperil global biodiversity more than any other contemporary phenomenon (Laurance et al., 2012). Isolated, relict highland refugia belong to some of the most fragile, and therefore threatened, kinds of environment on the planet, requiring immediate attention and action aimed at their researching and conservation. Examples of such environments are the flora habitats of the montane peat wetlands of the Guiana Shield Highlands, present in the highland and montane (Pantepui) biota scattered around the famous tabletop mountains – the tepuis (Figure 1) in Guyana, Venezuela, Brazil and extending as far west as the Chiribiquete and Macarena ranges in Colombia (Brewer-Carías, 1987), reaching up to 2994 masl on Pico da Neblina in Brazil.



Figure 1. Eastern face of Acopán-tepui in Venezuela, part of the extensive Chimanta Massif.

Development of modern remote-sensing, data transmission and horticultural automation technologies offer us a new unique insight into the tropical ecosystems and provide us with invaluable data that until now have not been possible to achieve. A combination of in situ microhabitat monitoring and ex situ flora propagation presents an innovative, wide-scope solution for long-term research and nature preservation: an approach called “Conservation through Cultivation”.

Area of Interest

The high-elevation areas of the tepui table mountains are important for science due to having remained in isolation for millions of years, allowing a wide variety of plant species to evolve in unique ways and adapt to survive in a very peculiar kind of environment (Figures 2 and 3). The areas of Pantepui remain some of the most obscure and least explored places on Earth (McPherson, 2008). The environmental bioclimatic characteristics that prevail in the highlands of the Guiana Shield, ranging from approx. 500 to 2994 masl have in most part not been periodically monitored. Taking into consideration the advancing global climate changes, tepui researchers envisage disruptions in altitudinal plant and animal species distribution and potential local habitat deterioration which are expected to put some of the locally endemic genera (e.g. *Heliamphora*, *Orectanthe* or *Stegolepis*) under the threat of going extinct. It is of utmost importance to present ways of securing those unique places and the plant biodiversity they host. In order to do so, it is imperative to obtain sufficient knowledge on how the environment behaves and how the survival of the plants can be ensured (Rull et al., 2019).

These peat wetland species belong to a floristic group currently also found in disrupted yet still extensive peat landscapes. Those peat formations date back 8400 years BP and are characterized by low temperature and frequently flooded habitats, associating wetland peat grasslands as low as 800 masl (Rull et al., 2019; Zinck et al., 2011). Water flowing from these biotas is characterized by



Figure 2. An example of the high montane Pantepui wetland biotope on the summit plateau of Acopán-tepui in Venezuela.

very acidic pH, related to the presence of fulvic and humic acids. On the other hand, given a high capacity of water retention, still not fully quantified, these communities are expected to provide an important hydrological service in the river basins of the Guiana Shield.

Project Methodology

Tepui-Sat is focused on the development of an innovative methodology for ecological research over the endemic flora habitats of the montane peat wetlands of the Guiana Shield Highlands (and potentially also other tropical montane biotas in the future, such as the Andes or the mountain ranges of Southeast Asia), enabling carrying out long-term monitoring over a wide spectrum of environmental phenomena and obtaining practical knowledge about the environmental needs of endemic plants for the sake of their introduction in ex situ cultivation. The main task of the project is the development of a system of two prototype devices: the FloraLink Field Probe (a device dedicated to measuring, collecting and transmitting environmental data from remote locations) and the FloraCube Environmental Chamber (digitally controlled environmental chamber capable of simulating specified environmental characteristics to match the horticultural requirements of certain plant species).

Although some tepuis of the Guiana Shield have already been monitored by local hydrometeorological services via automatic weather stations, the FloraLink Field Probe will focus on obtaining strictly practical horticultural information from the habitats and collect data associated with a selection of environmental particulars at the microhabitat level of the wetland plants, such as:

Atmosphere: relative temperature, relative humidity and atmospheric pressure,

Lighting Conditions: PAR (photosynthetically active radiation) and solar radiation flux,



Figure 3. Peat marshland with *Brocchinia reducta* and *Brocchinia hechtiioides* in the Gran Sabana under Upuigma-tepui, Venezuela.

Soil: soil temperature and soil moisture,

Precipitation: leaf wetness.

The data will then be transmitted with the use of a wireless data transmission unit (satellite or GSM) to a data cloud to be accessed remotely and implemented in the FloraCube Environmental Chamber's digital control system.

In the second stage of the project, the FloraCube Environmental Chamber will use its subsystems to mimic a selected set of environmental conditions, using the datasets obtained from the FloraLink Field Probe for the sake of maintaining a population of living specimens of the Tepui flora, including the following:

Light: LED panel with accurate and photosynthetically efficient output spectrum,

Water Supply: rain simulation via automatic misting system and mountain haze simulation via ultrasonic foggers,

Temperature: thermal control unit.

A simplified graph presenting the expected operation of the system is shown in Figure 4.

Real Life Application

Ex situ cultivation of vulnerable plants remains one of the most effective means of ensuring the survival of the most fragile and precious species. Plant life is on the forefront of global extinction rates and therefore rapid actions must be taken should the preservation of endangered species be ensured for future generations. Obtaining practical knowledge about natural microhabitat conditions for endangered plant species and directly using it in horticultural undertakings deepen our understanding of the flora communities and allow to pave a way for the introduction of more effective nature conservation efforts.

An example of a successful introduction of the "Conservation through Cultivation" strategy for an endangered species into large-scale cultivation is a Bornean endemic pitcher plant from Mount Kelam in Kalimantan, *Nepenthes clipeata* (Cantley et al., 2005). Being critically endangered in its natural habitat due to various factors (e.g. poaching), the plant has recently been distributed among botanical gardens, in vitro nurseries and private collectors all around the world ensuring its survival and bringing hope for possible re-introduction in its natural habitat in the future.

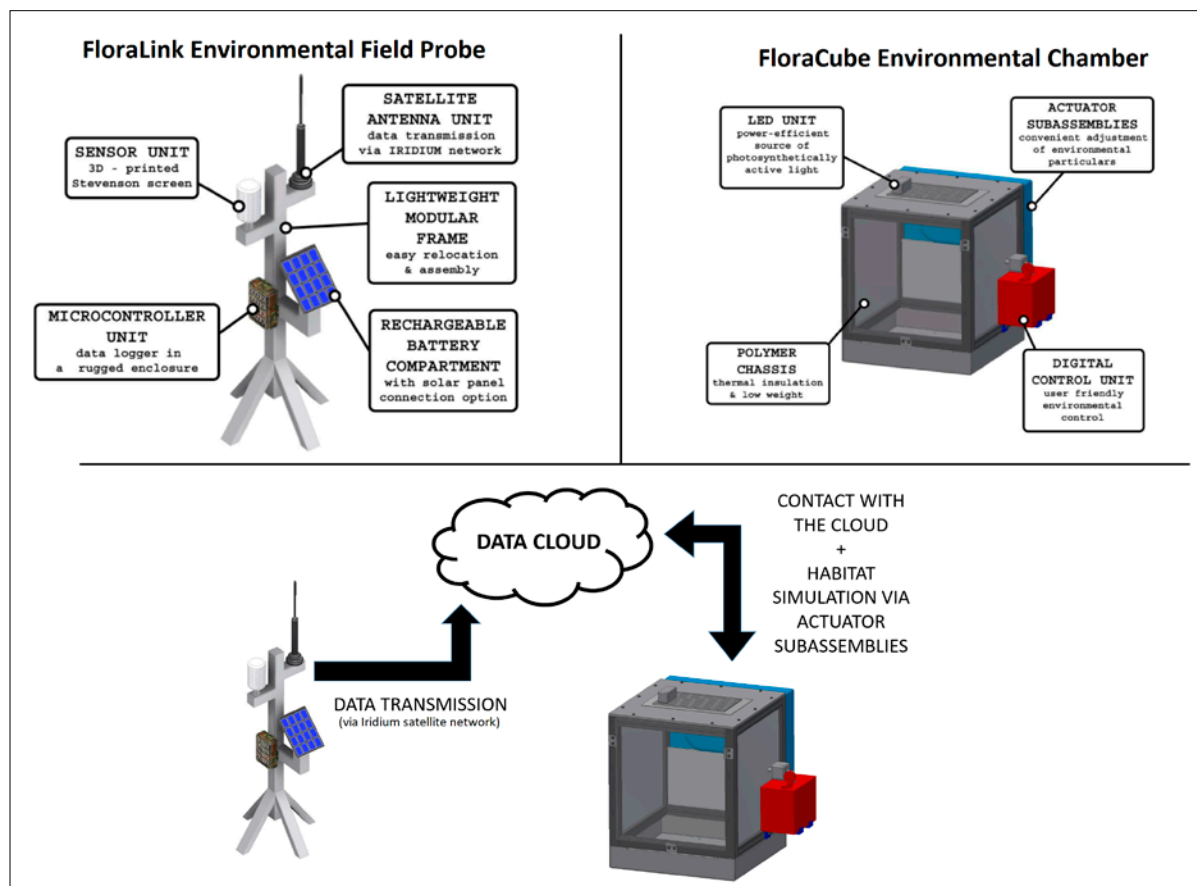


Figure 4. Expected operation of the Tepui-Sat system.



Figure 5. Representatives of the Pantepui flora (e.g. *Heliamphora*, *Drosera*, *Chimantaea* and *Stegolepis*) successfully cultivated in one of the author's conservatory chambers.

Desired Outcomes of the Project

The main focus of the project is the development of equipment aimed at both amateur and professional users, such as botanical gardens and nature enthusiasts who want to embark upon a variety of research projects (environmental monitoring, plant cultivation and propagation, etc.) but choose not to rely on expensive "close-source" equipment and do not possess the technical skills which would enable them to design and build the essential hardware themselves. Introducing this kind of devices to the market brings a tremendous possibility of sharing and popularizing scientific and nature interests among a large number of people, especially the youth (Figure 5).

Spreading these kinds of interests may be a crucial part of nature conservation projects in the near future, as propagating rare plant species can be one of the best ways to help them survive in the times of massive species extinction and climate changes. The desired outcomes of Tepui-Sat Project are as follows:

- Development of reliable and user-friendly equipment for environmental monitoring and plant cultivation,
- Promotion of nature conservation-related topics,
- Promotion of responsible plant collecting and cultivation as a hobby helping nature conservation cases,

- Positive impact and capacity building in rural areas of developing countries, especially ones hosting the tepui montane environments.

References

- Brewer-Carías, C. (1987). *The lost world of Venezuela and its vegetation*. Caracas, Venezuela.
- Cantley, R., Clarke, Cokendolpher, J. C., Rice, B. A. & Wistuba, A. (2005). *Nepenthes clipeata Survival Project*. *Carnivorous Plant Newsletter*, 34(4): 116–120.
- Laurance, W. F., Useche, D. C., Rendeiro, J., Kalka, M., Bradshaw, C. J. A., Sloan, S. P., Laurance, S. G., Campbell, M., Abernethy, K., Álvarez, P., Arroyo-Rodríguez, V., Ashton, P., Benítez-Malvido, J., Blom, A., Bobo, K. S., Cannon, C. H., Cao, M., Carrol, R., Chapman, C., . . . Zamzani, F. (2012). *Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas*. *Nature*, 489, 290–294.
- McPherson, S. (2008). *Lost worlds of the Guiana Highlands*. Poole, Redfern Natural History Productions.
- Rull, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Huber, O. & Señaris, C. (Eds.). (2019). *Biodiversity of Pantepui: The pristine 'lost world' of the neotropical Guiana Highlands*. Cambridge, Elsevier.
- Zinck, J. A., García, P. & Van der Plicht, J. (2011). *Tepui peatlands: Age record and environmental changes*. In Zinck J. and Huber O. (Eds.) *Peatlands of the western Guayana Highlands, Venezuela*. *Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, vol. 217, 189-236. Heidelberg, Springer.

Árbol de Decisión para Delimitación de Ecosistemas de Montaña en la UH Pariac-Rajucolta, Aplicando Teledetección

Decision Tree for Delimitation of Mountain Ecosystems in the UH Pariac-Rajucolta by Applying Remote Sensing

Raquel Rios Recra¹ y Beatriz Fuentealba Durand¹

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

Resumen

Este artículo muestra el uso de un “árbol de decisión” con entrada de capas de las características geográficas que condicionan el desarrollo de cada ecosistema de montaña, complementándolo con capas de clasificación por Spectral Angle Mapper por cada ecosistema predominante presente (pajonal, humedal, matorral, bosque relicto), capas de análisis de ratios de los datos espectrales y el índice de infrarrojo para los humedales, que han sido aplicadas con la finalidad de delimitar los ecosistemas en la Unidad Hidrográfica (UH) Pariac-Rajucolta en el departamento de Ancash, Perú. Para obtener mejores resultados en la delimitación con esta metodología, se realizaron correcciones (radiométricas, atmosféricas y topográficas) a las imágenes satelitales utilizadas. Los sensores utilizados son Sentinel 2 por su resolución espectral y ALOS PALSAR por su resolución espacial. Se obtiene un análisis de exactitud final ($K=0.98$) con un alto grado de concordancia, validado con información de puntos tomados en campo de coberturas representativas de los ecosistemas presentados.

Palabras clave: *Árbol de decisión, ecosistemas de montaña, Sentinel 2, Ancash*

Abstract

This article shows the use of a “decision tree” with layered input of the geographical characteristics that determine the development of each mountain ecosystem, complementing it with classification layers by Spectral Angle Mapper for each predominant ecosystem present (pajonal, wetland, scrub, relict forest), analysis layers of spectral data ratios and the infrared index for wetlands, which have been applied in order to delimit the ecosystems in the hidrographic unit (UH in Spanish) Pariac-Rajucolta in the department of Ancash, Peru. To obtain better results in the delimitation with this methodology, corrections (radiometric, atmospheric, and topographic) were made to the satellite images used. The sensors used are Sentinel 2 for its spectral resolution and ALOS PALSAR for its spatial resolution. A final accuracy analysis is obtained ($K=0.98$) with a high degree of agreement, validated with information from points taken in the field of representative coverage of the ecosystems presented.

Keywords: *Decision tree, mountain ecosystems, Sentinel 2, Ancash*

Introduction

La identificación y delimitación de los ecosistemas de montaña es el primer paso para la gestión de los recursos naturales y sus servicios ecosistémicos, siendo fundamentales para la supervivencia de nuestra sociedad. Incorporar la variedad espaciotemporal de las coberturas vegetales de los ecosistemas de montaña es un reto en el proceso de delimitación. En este caso, se propone el uso de un “árbol de decisión” para incorporar criterios basados en el conocimiento (condiciones geográficas de desarrollo de cada ecosistema). El resultado muestra un árbol de decisión aplicado para la delimitación de cuatro ecosistemas de montaña, obteniendo la detección de todos los ecosistemas con las variables que los condicionan para su asentamiento en el espacio geográfico. El alto grado de concordancia no solo muestra la precisión de la metodología propuesta sino también la aplicabilidad de la misma en otros ecosistemas de montaña del Perú (Adauto Aguirre y Willems, 2015).

Metodología

La presente metodología propuesta fue aplicada en la UH Pariac-Rajucolta, ubicada en el distrito y provincia de Huaraz, departamento de Ancash, utilizando datos libres del sensor Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea, escogido por su resolución espacial (10-20 m) y su resolución espectral (13 bandas), descargados a nivel L1C de corrección al Tope de la Atmósfera (TOA).

A continuación, se detallan los procedimientos seguidos para ser integrados al final en el árbol de decisión:

Corrección de Reflectancia en Superficie del Suelo (BOA)

Este nivel de corrección fue realizado con el software SNAP (Sentinel Application Platform) de la Agencia Espacial Europea (ESA), utilizando la caja de herramientas Sen2Cor, a la escena Sentinel 2 - Nivel 1C, para obtener el nivel 2C, que es un nivel de corrección necesario que estima el vapor de agua y la profundidad

de absorción para una mejor luminosidad sin vapor de agua, obteniendo píxeles de mayor nitidez. La corrección a BOA aplica un algoritmo de corrección que utiliza las bandas 10 (banda de nubes), la banda 2 (banda azul), banda 4 (banda roja) y la banda SWIR para la medición de transparencia atmosférica con el Factor AOT (Aerosol Optical Thickness)

Corrección Topográfica

Se aplicó la corrección topográfica debido a que la zona de estudio es montañosa y los resultados de una clasificación no son nítidos en las zonas de elevada pendiente por la presencia de sombras. Los datos de los valores en niveles digitales (ND) de la superficie terrestre en la imagen satelital varían porque el ND depende de la cubierta terrestre y de su orientación al sol. En zonas donde la superficie no está orientada al sol, el ND disminuye y, en zonas que están orientadas al sol, el ND aumenta. La corrección topográfica homogeniza los ND de las zonas más iluminadas y de las zonas menos iluminadas o con sombra, produciendo un efecto de aplanamiento de la superficie. El resultado nos muestra que las zonas orientadas al sol tienen un ND corregido menor al ND observado, las zonas no orientadas al sol tienen un ND corregido mayor al ND observado y las zonas horizontales tienen un ND corregido igual al ND observado.

La fórmula utilizada está dada por el Método de Minnaert (1941):

$$\rho_{\lambda,h,i} = \rho_{\lambda,i} \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \gamma_i} \right)^\kappa$$

$\rho_{\lambda,h,i}$: Reflectancia de un píxel en terreno horizontal

$\rho_{\lambda,i}$: Reflectancia de un píxel en terreno horizontal

θ_s : Ángulo cenital solar

γ_i : Ángulo de incidencia en un píxel i

κ : Constante de Minnaert para: $\kappa = 0.5$
(por ser zona de elevada pendiente)

Variables Geográficas

La geografía de las zonas de montaña en la cordillera de los Andes se caracteriza por tener un relieve muy accidentado debido a la orogénesis andina, lo cual posibilita cotas que superan los 6000 m s.n.m. Siendo así, un análisis de las condiciones en las zonas de montaña en el Perú es importante porque las características altitudinales están relacionadas con la variación de temperatura y las precipitaciones en sus diversos tipos de formas (líquida, sólida). Además, las características de pendiente tienen una influencia en los tipos de coberturas vegetales que se asientan ya que el declive facilita la erosión y las pendientes suaves facilitan la acumulación de agua.

Datos geográficos utilizados para la UH Pariac-Rajucolta son los siguientes (Tabla 1).

Análisis de Cociente de Bandas

Las respuestas espectrales de los glaciares, espejos de agua y sombras presentan una marcada reflectancia en el espectro visible y en el infrarrojo cercano, siendo útil la técnica de cociente de bandas que ayuda a discriminar este tipo de coberturas diferentes de los ecosistemas herbáceos. Para ello, se realizó la división de las reflectancias en las longitudes de onda que presentan menor y mayor reflectancia. Específicamente, las longitudes de onda utilizadas para los cocientes de bandas son las siguientes (Tabla 2).

La respuesta espectral del agua y la sombra es muy similar debido a que presenta alta absorción de energía en la región infrarroja y azul del espectro electromagnético. Por tal motivo, se utilizó la pendiente para discriminar el espejo de agua y la sombra. Siendo las pendientes mayores asociadas a las sombras (25.6° a 80°) y las pendientes planas asociadas a los espejos de agua (0° a 25.5°).

Tabla 1. Rangos de altitud y pendiente utilizados para cada ecosistema.

Ecosistemas	Altitud (m s.n.m.)		Pendiente (grados°)	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Bosque relicto	4300	4800	30	80
Humedal	3750	4800	0	15
Matorral	3750	4800	0	15
Pastizal	3750	4800	16	80

Tabla 2. Bandas características por cobertura.

Cobertura	Región espectro electromagnético	Respuesta espectral micrómetros (µm)	
		mínimo	máximo
Glaciar	SWIR	1.539	1.682
	Azul	0.440	0.530
Espejo de agua y sombra	NIR	0.694	0.713
	Azul	0.440	0.530

Índice de Humedad (Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada-NDII)

El Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII por sus siglas en inglés) es una fórmula efectiva para resaltar el almacenamiento de humedad en el suelo, la cual se utilizó para obtener una mejor delimitación para los humedales. La fórmula utilizada para el NDII (Hardisky et al., 1983) fue la siguiente.

$$NDII = \left(\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \right)$$

Clasificación Supervisada por Spectral Angle Mapper (SAM)

Es un algoritmo de clasificación supervisada que utiliza el cálculo del ángulo espectral en radianes para diferenciar las clases identificadas. En este caso, se utilizaron puntos de ubicación tomados en campo de coberturas conocidas para cada clase. El SAM distingue la similitud de un espectro de referencia con el espectro del píxel de la imagen, mediante el cálculo del ángulo en radianes entre los dos espectros antes mencionados, tomándolos como vectores en n-dimensión (Kruse et al., 1993).

Tabla 3. Ángulos de mapeo y cantidades de endmember utilizados por cada ecosistema.

Ecosistemas	Ángulo en radianes	Cantidad de endmember
Bosque relictos	0.065	7
Humedal	0.070	8
Matorral	0.085	6
Pastizal	0.065	7

Los endmember de los píxeles utilizados de la imagen para cada ecosistema fueron puntos tomados en campo para las coberturas vegetales que cumplan con el criterio de representatividad y predominancia por cada ecosistema. Como parte del análisis de los datos a utilizar, se realizó la elección de puntos levantados en campo que, identificados en la imagen satelital, presentan mucha similitud en sus respuestas espectrales. Todo lo antes mencionado mejora el resultado de clasificación para el método SAM.

Árbol de Decisión

Un árbol de decisión es un clasificador binario discriminante que utiliza umbrales mínimos y máximos para enmascarar los píxeles de la imagen satelital que tengan los valores dentro del rango identificado en cada nodo de decisión. Para la UH Pariac-Rajucolta, se generó un árbol de decisión con 12 nodos de entradas de decisión binaria (Figura 1) para clasificar cuatro ecosistemas herbáceos (humedal, bosque relictos, matorral y pastizal) y discriminar tres coberturas de montaña (glaciar, espejo de agua y sombra).

Las máscaras aplicadas para la clasificación utilizando el árbol de decisión son las siguientes:

- Características geográficas: altitud (DEM) y pendiente (Slope),
- Cociente de Bandas: glaciar, espejo de agua y sombra,
- Índice de Humedad (NDII),
- Clasificaciones con Spectral Angle Mapper (SAM): bosque relictos, matorral, humedal y pastizal.

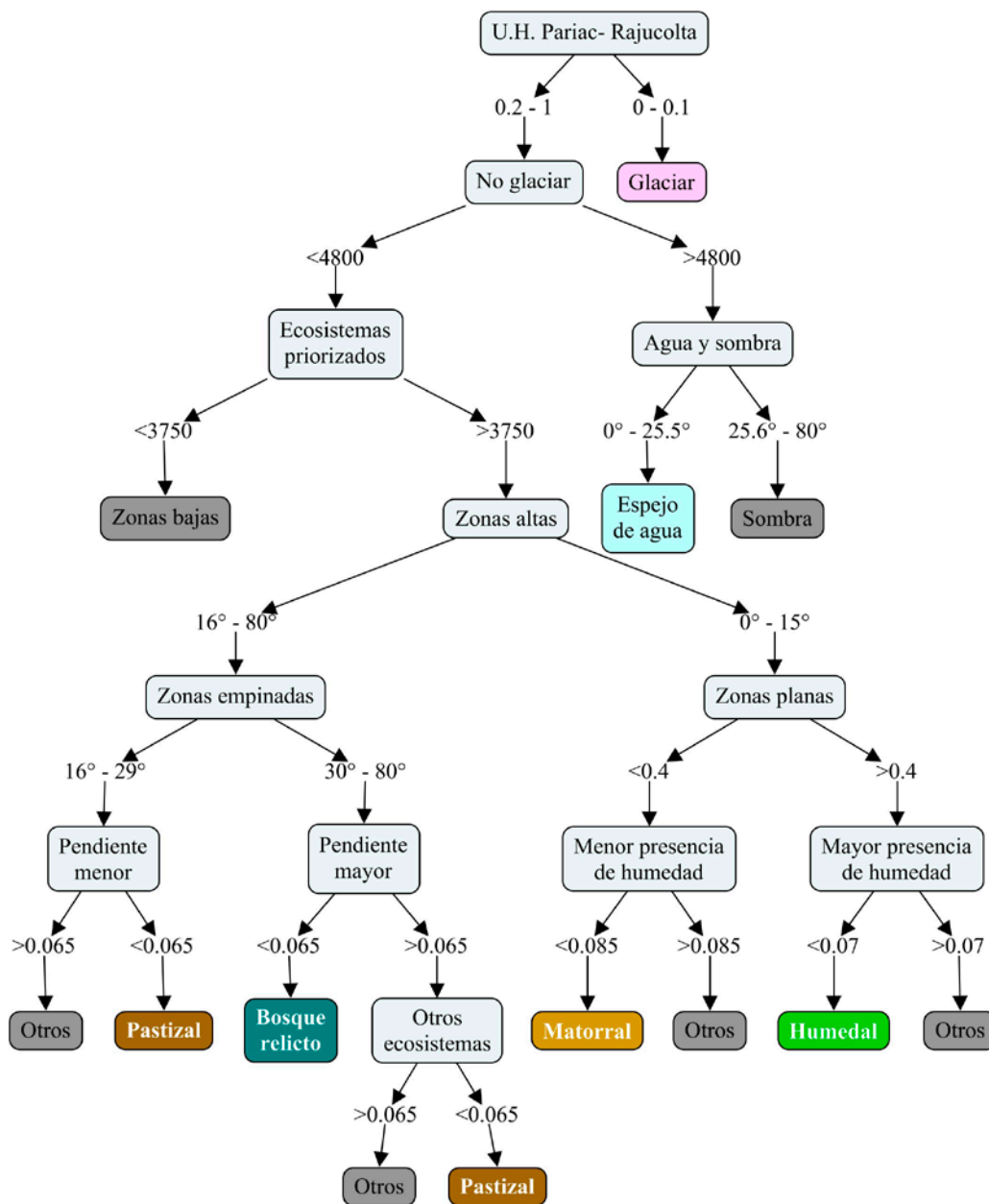


Figura 1. Árbol de decisión para la UH Pariac-Rajucolta. Fuente: Elaboración propia..

Resultados

La UH Pariac-Rajucolta tiene una superficie total de 10,702.6 ha, teniendo el 27.7% como superficie clasificada para ecosistemas de montaña priorizados como bosque relicto, matorral, humedal y pastizal con 2964.16 ha (Tabla 4). Se pudo discriminar un 12.2% de cobertura glaciar, espejos de agua y sombras para la UH Pariac-Rajucolta con 1305.24 ha. Los resultados de la clasificación final utilizando el árbol de decisión muestran una alta correlación en la delimitación de todos los ecosistemas de montaña clasificados con un índice kappa de 0.98, cubriendo alrededor del 40% (4269.4 ha) de la UH Pariac-Rajucolta.

Tabla 4. Superficies por tipo de ecosistema de montaña.

Coberturas	Área (ha)
Bosque relicto	145.44
Matorral	188.61
Humedal	74.31
Pastizal	2555.80
Glaciar	1208.53
Espejo de agua	62.56
Sombra	34.15

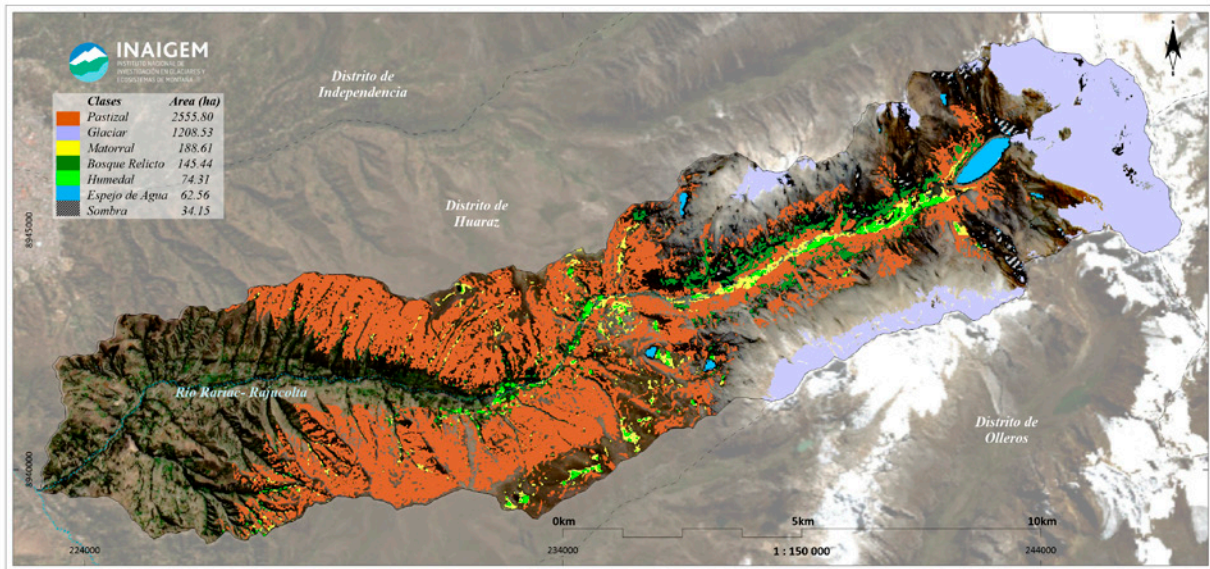


Figura 2. Mapa de ecosistemas de montaña de la Unidad Hidrográfica Pariac-Rajucolta. Fuente: INAIEM

En el caso de los humedales, se obtuvo una buena identificación, siendo posible debido a la caracterización geográfica con condiciones que posibiliten el asentamiento de humedad. En algunas zonas de bosques relictos, se confunden con los matorrales, lo cual se puede mejorar cambiando el orden de las entradas de las máscaras en el árbol de decisión. Se identificó la presencia de pastizales alrededor de los humedales debido a las condiciones geográficas similares de estos dos ecosistemas. En la zona de matorrales, se obtuvo un efecto de sal y pimienta (píxeles aislados y píxeles huecos esparcidos en la parte clasificada), lo cual se podría mejorar con datos de firmas espectrales tomadas en campo. El resultado final se presenta en la Figura 2.

Conclusiones

La delimitación de los ecosistemas de montaña es un proceso complejo que requiere incluir datos de condiciones geográficas y datos de respuestas espectrales, siendo el árbol de decisión una opción más ideal que permite un mejor ajuste porque, al utilizar datos de pendiente, altitud y respuesta espectral de los ecosistemas, facilita que la decisión binaria del árbol tenga los suficientes conocimientos y nos dé una buena clasificación que disminuya problemas de sobreajuste (overfitting) o subajuste (underfitting).

Otra ventaja del árbol de decisión es que permite realizar la clasificación de cada ecosistema por separado, evitando que los algoritmos utilizados fueren a la pertenencia de una clase que no corresponde.

Esta propuesta metodológica de delimitación de ecosistemas de montaña con el uso de un "árbol de decisión" obtuvo un índice de kappa de 0.98.

Referencias

- Adauto Aguirre, M. E. y Willems, B. L. (2015). Identificación de humedales alto andinos integrando imágenes Landsat y Aster GDEM con árbol de decisión sobre la cabecera de las cuencas Pisco y Pampas en Huancavelica – Perú. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015. INPE.
- Hardisky, M. A., Klemas, V. & Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(1), 77-83.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J. & Goetz, A. F. H. (1993). The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 145-163.
- Minnaert, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophysical Journal*, 93, 403-410.

Diseño y Aplicación Piloto de la Encuesta de Presiones Antropogénicas en Cuencas Altoandinas (EPACA)

Design and Pilot Application of the Survey of Anthropogenic Pressures in High Andean Basins (EPACA)

Fabiola V. Cárdenas Maldonado^{1,2*}, Rossi Taboada^{1,3}, Noemí Tomaylla¹, Lisbeth Pariona², Bram Willems^{1,3} y Chad Staddon⁴

¹ Centro de Competencias del Agua, Lima

² Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima

³ INAIGEM (desde 2021), Huaraz

⁴ University of the West of England, Bristol

*fabiola.cardenas@unmsm.edu.pe

Resumen

Los ecosistemas altoandinos han albergado históricamente a grupos humanos con identidades vinculadas al territorio. Estas comunidades ejercen presiones en el ecosistema, pero también son las llamadas a conservarlo. Por ello, es importante entender la dinámica del socio-ecosistema de cabecera de cuenca: las presiones antropogénicas, la situación de las comunidades y el manejo de recursos naturales que ellas realizan. El diseño y aplicación piloto de la EPACA (Encuesta de Presiones Antropogénicas en Cuencas Altoandinas) tiene como objetivo proponer un instrumento de recolección de datos para evaluar las presiones antropogénicas que tienen lugar en un socio-ecosistema determinado. Fue elaborada en el marco del proyecto Newton-Paulet Institutional Links "Fortalecimiento de las capacidades locales para el manejo sostenible de los humedales de cabeceras de cuencas Andinas frente al cambio global".

La encuesta está basada en el esquema PIR (presión, impacto y respuesta) de la OCDE y contempla cinco dimensiones: 1) la ubicación geográfica, 2) la caracterización socioeconómica de las familias, 3) las actividades económicas, 4) las actividades domésticas, y 5) el desarrollo de técnicas de manejo de recursos naturales. Además, la reciente aplicación de la encuesta en la Comunidad Campesina de Chuschi (Ayacucho), caracterizada por la presencia de bofedales en la zona sallqa, ha permitido identificar los alcances y limitaciones de un instrumento pensado para entender las complejas relaciones entre el ser humano y el ecosistema.

Palabras clave: *Presiones antropogénicas, cuencas altoandinas, encuesta, socio-ecosistema, Chuschi*

Abstract

The high Andean ecosystems have historically housed human groups with identities linked to the territory. These communities exert pressure on the ecosystem, but they are also called upon to conserve it. For this reason, it is important to understand the dynamics of the socio-ecosystem at the head of the basin: the anthropogenic pressures, the situation of the communities and the management of natural resources that they carry out. The design and pilot application of the EPACA (Survey of Anthropogenic Pressures in High Andean Basins) aims to propose a data collection instrument to assess the anthropogenic pressures that take place in a given ecosystem partner. It was prepared within the framework of the Newton-Paulet Institutional Links project "Strengthening local capacities for the sustainable management of Andean basin headwater wetlands in the face of global change."

The survey is based on the PIR scheme (pressure, impact and response) of the OECD and considers five dimensions: 1) geographic location, 2) socioeconomic characterization of the families, 3) economic activities, 4) domestic activities, and 5) development of natural resource management techniques. In addition, the recent application of the survey in the Peasant Community of Chuschi (Ayacucho), characterized by the presence of bofedales in the sallqa area, has allowed identification of the scope and limitations of an instrument designed to understand the complex relationships between human beings and the ecosystem.

Keywords: *Anthropogenic pressures, high Andean basins, survey, socio-ecosystem, Chuschi*

Antecedentes

Desde el año 2002, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) adapta modelos para la selección y elaboración de indicadores ambientales. Uno de ellos es el modelo PER (Presión-Estado-Respuesta), con indicadores de presión “estrechamente asociados a métodos de producción y de consumo” (Polanco, 2006), indicadores de estado que hacen referencia a la calidad y cantidad de recursos naturales, e indicadores de respuesta que “comprometen acciones y reacciones individuales y colectivas” para atenuar los efectos negativos de las actividades humanas o conservar y proteger los recursos naturales y el medio ambiente (Polanco, 2006). Sobre la base del modelo PER se han adaptado modelos más amplios como el de Presión-Estado-Impacto-Respuesta empleado por la Agencia Europea del Medio Ambiente, entre otros. Estos modelos, si bien brindan un diagnóstico importante, suelen estar sujetos a las escalas de información nacional o sectorial. Además, ponen en contexto actividades de gran impacto en el medio ambiente, como la actividad industrial o el comercio, pero no contemplan indicadores de presión, impacto y respuesta a escala doméstica.

Obtener información a escala de hogar permite entender la dinámica de un socio-ecosistema determinado y enfocar en primer plano las relaciones más directas entre el medio y los grupos humanos que la albergan. Así, por ejemplo, se sabe que entre febrero de 2017 y enero de 2018 el 10,6% de la población en el Perú no tenía acceso al agua por red pública y que esta cifra disminuye año tras año (INEI, 2018). El enfoque de hogar que se propone con la EPACA (Encuesta de Presiones Antropogénicas en Cuencas Altoandinas) permite saber que aún en familias peruanas con conexión a la red pública el uso de aguas de fuentes naturales es común en la realización de actividades como el lavado de ropa (61%) y la preparación de alimentos (30%) en la comunidad de Chuschi (Cárdenas, 2019).

El diseño de este instrumento está orientado a la obtención de indicadores ambientales de presión, impacto y respuesta para ecosistemas de gran importancia para la humanidad, como las cuencas altoandinas, y que, además, han albergado a comunidades que hasta hoy mantienen un vínculo muy estrecho con el territorio. Esta propuesta fue concebida en el marco del proyecto Newton-Paulet Institutional Links “Fortalecimiento de las capacidades locales para el manejo sostenible de los humedales de cabeceras de cuencas andinas frente al cambio global” y es parte del componente social del proyecto que tuvo lugar en la Comunidad Campesina de Chuschi en Ayacucho.

Socio-ecosistema de Estudio

Identificar un socio-ecosistema de estudio implica asumir que los sistemas sociales y ecológicos se acoplan y interactúan entre ellos, generando impactos y perturbaciones:

Los acoplamientos o interacciones socio-ecológicas son relaciones que se establecen entre estos subsistemas a través de diferentes vías. De un lado, a través del conjunto de actividades y procesos humanos que generan impactos en los sistemas ecológicos... y por el otro, a través de las dinámicas de los ecosistemas... que producen efectos sobre los sistemas sociales” (Salas-Zapata, Ríos-Osorio y Álvarez-Del Castillo, 2011, p. 137).

Las cuencas hidrográficas están definidas por criterios técnicos (por el sistema Pfafstetter en el caso peruano), pero están vinculadas a recurrentes ecosistemas como lagunas, pastos, matorrales, bofedales y bosques (Meléndez de la Cruz, 2019). Es así que el instrumento que se presenta fue diseñado para entender los acoplamientos entre los ecosistemas de cuencas altoandinas y los sistemas sociales o comunidades altoandinas que los habitan.

La aplicación piloto de la EPACA tuvo lugar en los territorios de la zona sallqa de la Comunidad Campesina de Chuschi, caracterizada por la presencia de bofedales. Esta área es también parte de la microcuenca del Chichlarazo, coincidente con la parte alta de Chuschi (Figura 1).

Metodología

El diseño de la EPACA contempló tres etapas: 1) identificación de dimensiones de la encuesta, 2) validación del contenido, y 3) aplicación piloto.

Identificación de Dimensiones de la Encuesta

En esta etapa se identifican las dimensiones por medir a partir de una revisión bibliográfica y un período de campo previos que permitieron ajustar metodológicamente las preguntas de percepción de las familias. Se ordenaron las preguntas en cinco dimensiones que orientan las 55 preguntas planteadas en el cuestionario final.

- a. La ubicación geográfica: En esta sección se considera, además de la distribución geopolítica, la escala más pequeña de la organización comunal. En el caso de la Comunidad Campesina de Chuschi, se consideran las localidades que la componen en la parte alta del Chichlarazo: Yanaccocha, Huaracco, Chaquiccocha, Pucruhuasi, Wacraccocha, Lerqona y Yupana.
- b. La caracterización socioeconómica de las familias: Se plantean cuatro preguntas básicas correspondientes a la composición de la familia (la unidad de observación) y 12 preguntas sobre las características de la vivienda y los servicios de los que disponen. En esta sección se consideran preguntas sobre el fenómeno de doble residencia característico de las

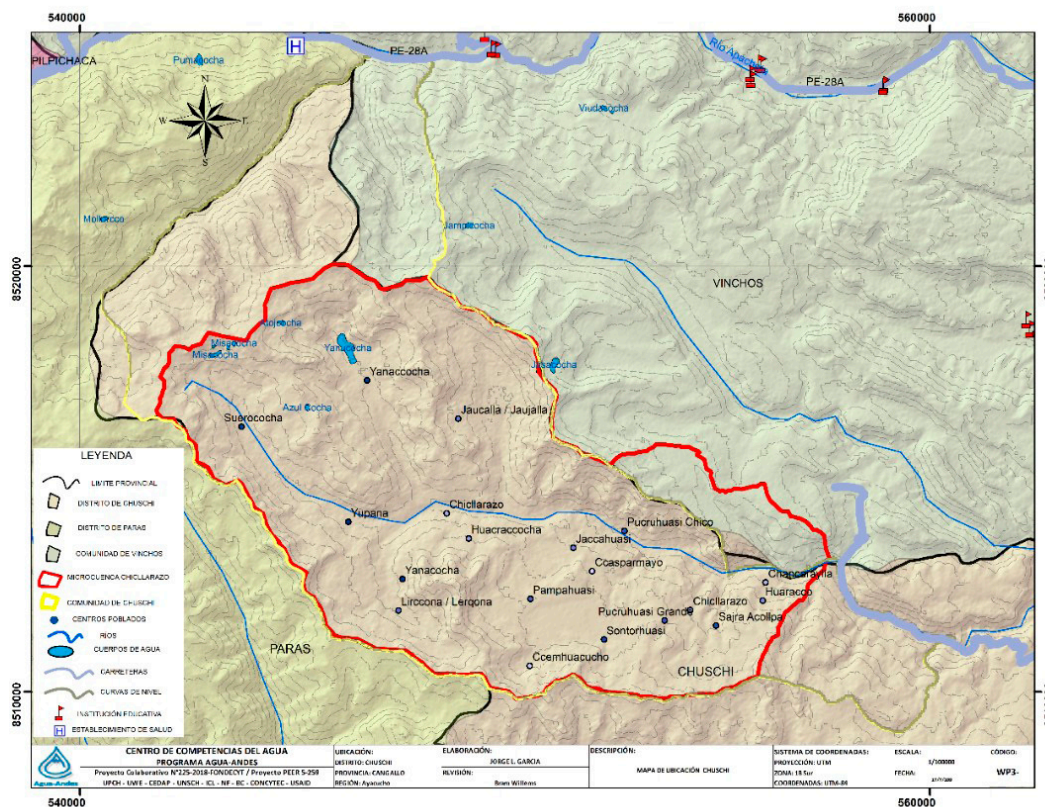


Figura 1: Microcuenca del Chichlarazo mostrando la parte alta de la Comunidad Campesina de Chuschi.

comunidades andinas por su relevancia en el manejo de recursos naturales y la seguridad alimentaria de las familias.

- c. Las actividades económicas: En esta sección se consideran las dos principales actividades económicas de las comunidades altoandinas: la agricultura (10 preguntas) y la ganadería (13 preguntas). Además, se consideran cuatro preguntas sobre los ingresos que percibe la familia por el desarrollo de estas actividades con el objetivo de obtener referencias sobre la racionalidad económica alrededor de las mismas.
- d. Las actividades domésticas: Esta sección está compuesta por cinco preguntas vinculadas al uso de fuentes de agua, el tipo de energía que utilizan las familias para la preparación de los alimentos, la disposición de excretas y el manejo de desechos.
- e. El desarrollo de técnicas de manejo de recursos naturales: Aquí se considera una pregunta dedicada al manejo del agua y otra, al manejo de suelos o pastos. El objetivo es indagar sobre el tipo de prácticas que existen en la zona a nivel familiar.

Validación de Contenido

Para validar el contenido de las preguntas (la simplicidad, pertinencia y la claridad del planteamiento de las mismas y de las alternativas), se aplicaron cuatro encuestas a pobladores de la zona alta de Chuschi, con el apoyo de dos encuestadoras quechua hablantes. Después de esta aplicación, se redujo la cantidad de preguntas planteadas hasta llegar a 55 que se consideran prioritarias para cumplir con los objetivos de la encuesta.

Aplicación Piloto

Los días 26 y 27 de julio de 2019, se realizó la aplicación piloto de la EPACA, gracias al apoyo de siete encuestadores quechua hablantes en el pueblo de Chuschi, en donde los comuneros de todos los sectores de Chuschi se reunieron para celebrar el aniversario de la comunidad. Los encuestadores aplicaron los cuestionarios a los comuneros de la parte alta, la zona del Chichlarazo, luego de una capacitación previa y con el apoyo de dos coordinadoras los días de la encuesta. El tipo de muestreo fue no probabilístico o por conveniencia y la distribución de las familias participantes por localidad se presenta en la Figura 2.

Aportes

La EPACA permitió obtener información básica sobre las presiones que ejerce la comunidad de Chuschi

Localidad	N° cuestionarios
<i>Yanacocha</i>	7
<i>Huaracco</i>	14
<i>Chaquiccocha</i>	9
<i>Pucruhuasi</i>	17
<i>Wacraccocha</i>	9
<i>Lerqona</i>	5
<i>Yupana</i>	9



Mariela Huaycha encuestando a un comunero de Chuschi (26/07/19).

Figura 2. Mapa de ecosistemas de montaña de la Unidad Hidrográfica Pariac-Rajucolta. Fuente: INAIGEM

en el Chichlarazo. Los datos obtenidos dan una buena referencia sobre el impacto de las actividades económicas y domésticas en el ecosistema. En el caso del Chichlarazo, se habla de una agricultura principalmente dedicada al autoconsumo y de una ganadería prioritariamente alpaquera.

Así mismo, el instrumento que se propone ha brindado información sobre la situación de los grupos humanos que son parte del ecosistema de estudio desde la perspectiva de las mismas familias. Finalmente, brinda información sobre las acciones de respuesta que despliega la comunidad frente al manejo de recursos naturales, en especial las acciones relativas al manejo de agua y suelos (pasto).

Resultados

Los resultados de la aplicación piloto en el Chichlarazo revelan que casi la totalidad de las familias encuestadas tienen dos casas (una en la zona urbana y la otra en la parte alta). Relativo a la situación de los habitantes del Chichlarazo y el posible impacto en la salud humana, los padecimientos más frecuentes están asociados a las enfermedades respiratorias (Figura 3).

La mitad de las familias que participaron de la encuesta se dedican a la agricultura, pero la gran mayoría (85.7%) a pequeña escala y con riego por secano. Así mismo, son muy pocas las familias que destinan algunos

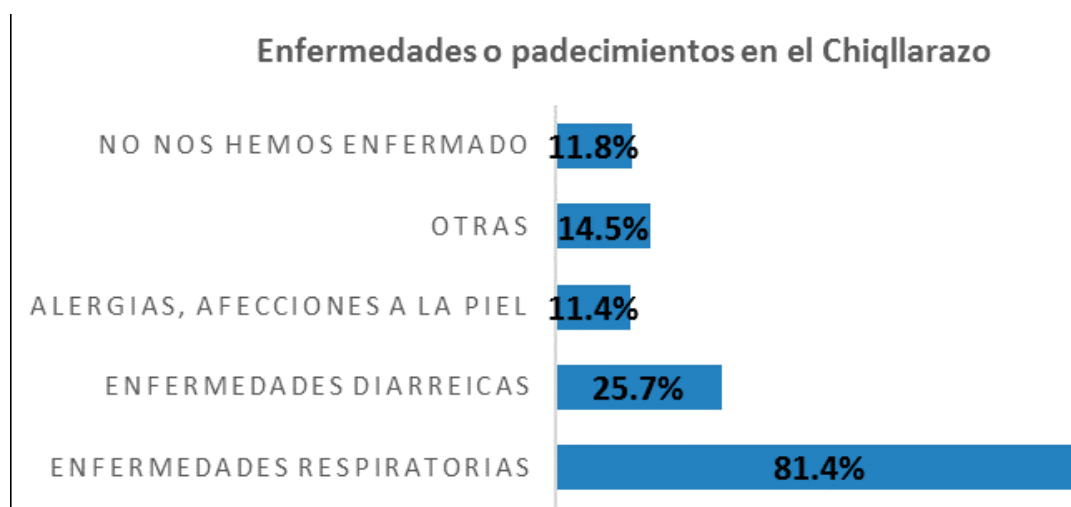


Figura 3. Enfermedades o padecimiento en el Chichlarazo.

de sus cultivos a la venta (ajo, olluco o papa) y lo hace principalmente en ferias locales (69%).

La ganadería es la fuente de ingresos principal de las familias de la zona sallqa, especialmente la ganadería alpaquera (87%). Una familia tiene en promedio 69 alpacas y 35 ovejas. En la Figure 4 se expone la cantidad de ganado total de los encuestados, indicando adultos y crías. Estos datos permiten proyectar el crecimiento de la carga animal que soportaría el ecosistema de la zona.

En cuanto a las presiones antropogénicas originadas por las actividades domésticas, la fuente de agua más común es el caño o el agua apta para el consumo. Sin

embargo, el 61% de las familias emplea fuentes de agua naturales para el lavado de ropa (Figura 5).

En cuanto al manejo de recursos naturales, los habitantes del Chicllarazo realizan con mayor frecuencia el cultivo de plantas llamadoras de agua (como la “putaja”) y la siembra de pastos. En las Figuras 6 y 7, se presentan los resultados detallados a escala de localidad. Se observa que las localidades responden de manera diferenciada ante el estado del ecosistema o ante las necesidades particulares relativas a los recursos naturales. Así, Yanacocha es una de las localidades en las que el cultivo de plantas no se encuentra tan extendido y es, al mismo tiempo, la única localidad que no presenta inseguridad hídrica.

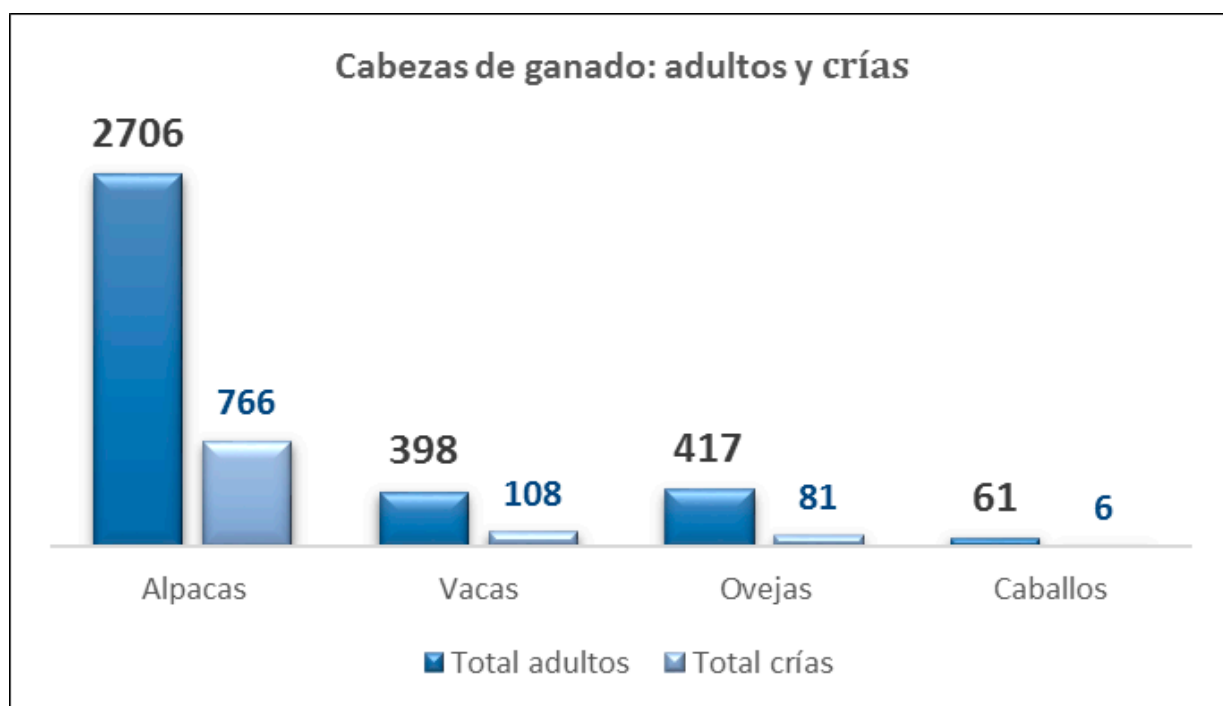


Figura 4. Cantidad de ganado de familias encuestadas del Chicllarazo.

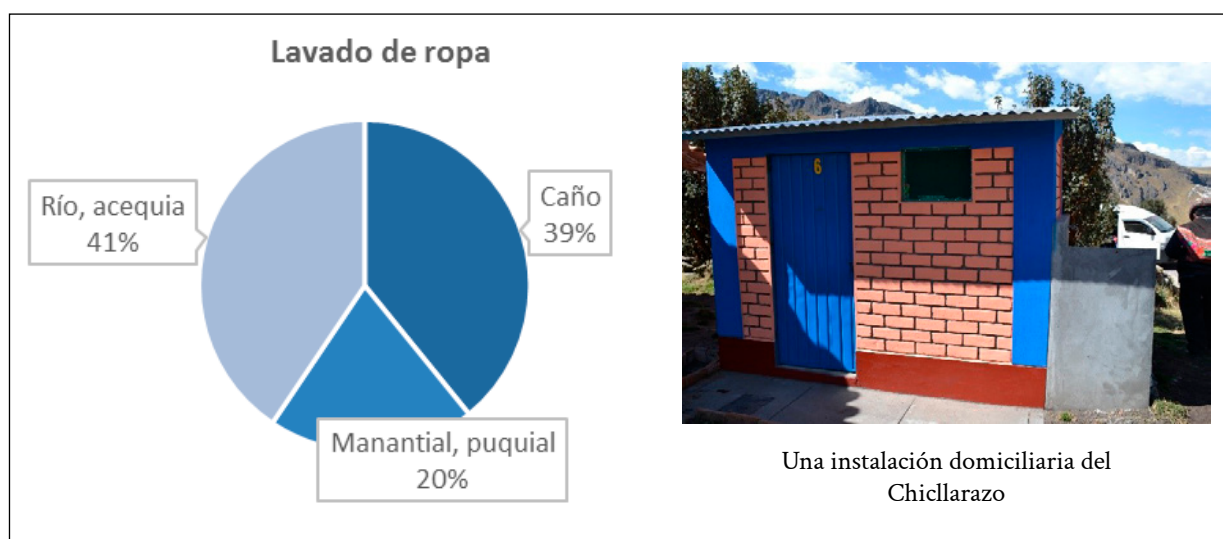


Figura 5. Fuentes de agua para el lavado de ropa entre familias encuestadas del Chicllarazo

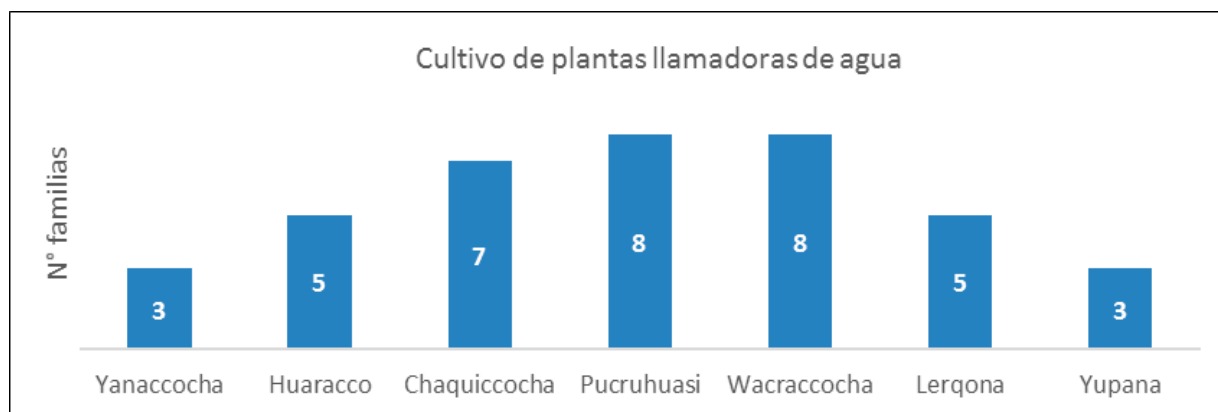


Figura 6. Cultivo de plantas llamadoras de agua en Chicllarazo

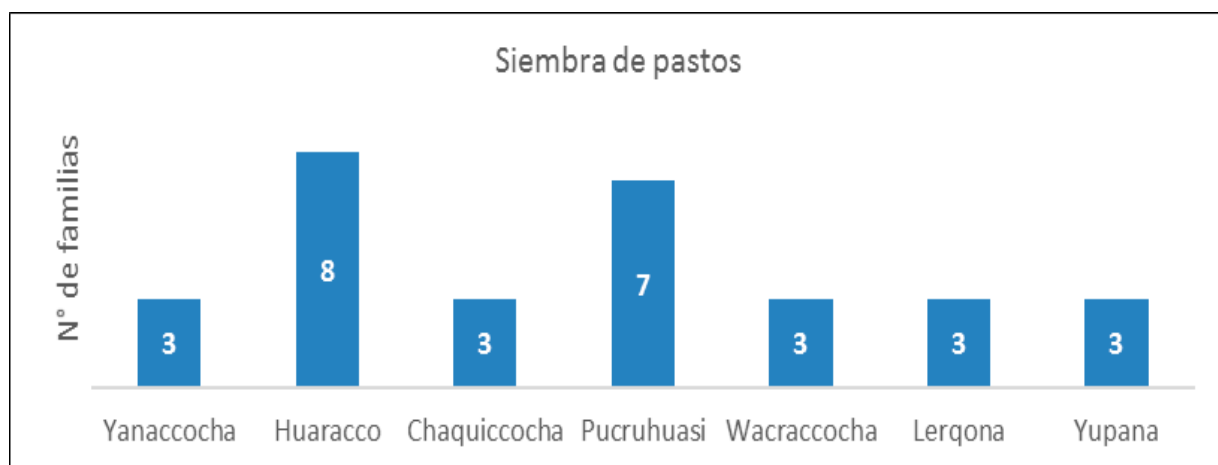


Figura 7. Siembra de pastos en localidades del Chicllarazo.

Agradecimientos

A Mariela Huaycha, Alex Gavilán, Nazia Loayza y Antonella, Dayma Quintas y Álvaro Ayala por su invaluable apoyo en la aplicación de las encuestas. A Luis F. Bartolo Alegre por el apoyo en la edición del póster presentado en la ciudad de Cusco los días 10, 11 y 12 de diciembre de 2019. Para la sección sobre “el desarrollo de técnicas de manejo de recursos naturales”, se contó con el apoyo de los ingenieros Fernando Quinto y Julián Llanto, integrantes del proyecto Newton-Paulet y del Centro de Competencias del Agua.

Referencias

Cárdenas, F. (2019). Análisis descriptivo de los resultados de la encuesta de presiones antropogénicas en cuencas altoandinas (EPACA). Lima, documento no publicado en posesión del autor.

INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (marzo de 2018). Perú: Formas de acceso al agua y saneamiento básico. Lima, Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Meléndez de la Cruz, J. F. (2019). La identificación de las cabeceras de cuencas hidrográficas: métodos y aplicaciones. *Investigaciones Sociales*, 22(40), 111-120.

Polanco, C. (2006). Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones. *Gestión y Ambiente*, 9(2), 27-41.

Salas-Zapata, W. A., Ríos-Osorio, L. A., & Álvarez-Del Castillo, J. (2011). Bases conceptuales para una clasificación de los sistemas socioecológicos de la investigación en sostenibilidad. *Revista Lasallista de Investigación*, 8(2), 136-142.

Experiencias de Inseguridad Hídrica en Hogares en la Comunidad Campesina de Chuschi (Ayacucho, Perú)

Experiences of Water Insecurity in Households in the Peasant Community of Chuschi (Ayacucho, Peru)

Rossi Taboada Hermoza¹, Fabiola Cárdenas Maldonado^{1,2}, Noemí Tomaylla Berrocal¹, Doris Lisbeth Pariona Flores^{2,3}, Bram Willems^{1,5} y Chad Staddon⁴

¹ Centro de Competencias del Agua, Lima

² Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima

³ Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho

⁴ Universidad del Oeste de Inglaterra, Bristol

⁵ INAIGEM (desde 2021), Huaraz

Resumen

La escala de experiencias de inseguridad hídrica en hogares (HWISE, por sus siglas en inglés) es una herramienta que produce puntajes equivalentes en diversos entornos ecológicos para identificar dónde y cuándo ocurren experiencias de inseguridad hídrica, así como quién experimenta esta condición y en qué medida. Compuesto por 12 preguntas (ítems), este instrumento aborda las experiencias del encuestado o de algún miembro del hogar relacionadas con las dimensiones físicas y no físicas del acceso al agua, que pueden repercutir en la salud física y mental, y en el desarrollo de actividades productivas, sociales y culturales en las últimas cuatro semanas antes de la encuesta.

En julio de 2019, la encuesta fue aplicada a 70 familias de la Comunidad Campesina de Chuschi (Ayacucho, Perú) que poseen una vivienda en el ámbito de la microcuenca del Chicllarazo (o zona sallqa), caracterizada por la presencia de bofedales. En dicho ámbito, que coincide con siete barrios de la comunidad, las familias desarrollan la ganadería como principal actividad económica y los hogares cuentan con servicios básicos de agua potable, aunque poco saludable (sin cloración). Los resultados indican que las experiencias de inseguridad hídrica más frecuentes son la “preocupación” por no tener suficiente agua (90% de los encuestados experimentó esta situación al menos una vez en las cuatro semanas previas) y la “interrupción” o limitación de su principal fuente de agua (84%). Entre los resultados sobre la estimación a escala de localidad, se observa que solo un barrio (Yanacocha) no presenta la condición de inseguridad hídrica. A escala comunal, el 64% de los hogares encuestados presentan inseguridad hídrica.

Palabras clave: *Inseguridad hídrica, bofedales, comunidad campesina de Chuschi*

Abstract

The Household Water Insecurity Experiences Scale (HWISE) is a tool that produces equivalent scores across various ecological settings to identify where and when experiences of water insecurity occur, as well as who is water insecure and to what extent. Composed of 12 questions (items), this instrument addresses the experiences of the respondent, or a member of the household, which are related to the physical and non-physical dimensions of access to water which can have repercussions on physical and mental health, and on the development of productive, social and cultural activities in the four weeks prior to the survey.

In July 2019, the survey was applied to 70 families from the Peasant Community of Chuschi (Ayacucho, Peru) who own a home in the Chicllarazo micro-basin (or sallqa zone), characterized by the presence of wetlands. In this area, which coincides with seven neighborhoods of the community, families raise livestock as the main economic activity, and households have basic drinking water services, although unhealthy (without chlorination). The results indicate that the most frequent experiences of water insecurity are the “concern” about not having enough water (90% of respondents experienced this situation at least once in the previous four weeks) and the “interruption” or limitation of their main water source (84%). Among the results on the estimation at the local level, it is notable that only one neighborhood (Yanacocha) does not present the condition of water insecurity. At the community level, 64% of the households surveyed are water insecure.

Keywords: *Water insecurity, wetlands, peasant community of Chuschi*

Introducción

Estimar la inseguridad hídrica a partir de la frecuencia de experiencias vinculadas a la falta de acceso o al acceso inoportuno al agua, permite indicar el impacto del recurso hídrico en diferentes aspectos de la vida de individuos y familias. Para ello, se emplea la escala de experiencias de inseguridad hídrica en hogares (HWISE), un instrumento validado transculturalmente en más de 20 países. Su aplicación fue complementaria a la Encuesta de Presiones Antropogénicas en Cuencas Altoandinas (EPACA) en siete barrios de la Comunidad Campesina de Chuschi, donde las familias -predominantemente quechuahablantes- desarrollan la ganadería como principal actividad económica y los hogares cuentan con servicios básicos de agua potable, aunque poco saludable (sin cloración).

En este resumen extendido, se expone brevemente en qué consiste la HWISE y el proceso de su aplicación, procesamiento de información y análisis. En el tercer punto, se presentan los resultados del análisis descriptivo. Finalmente, en el cuarto punto se presentan las conclusiones de la primera aplicación de esta encuesta en el Perú.

Metodología

La Escala de Experiencias de Inseguridad Hídrica en Hogares

Jepson et al. (2017, citado en HWISE RCN, 2019, p. 4) definen inseguridad hídrica como “una condición cuando la asequibilidad, la confiabilidad, la adecuación y la seguridad se reducen significativamente o son inalcanzables [como] para amenazar o poner en peligro el bienestar, lo que incluye la salud física y mental y la capacidad de emprender las actividades productivas, sociales y culturales necesarias”. Desde la década de 1990, diversos autores han desarrollado instrumentos para medir el grado de esta condición (Jepson et al., 2017; Wutich et al., 2017). Sin embargo, en ellos se ha explorado sobre dimensiones físicas del acceso al agua.

A su vez, como señalan Young et al. (2019), tanto las preguntas como las escalas de estos instrumentos no han sido validados para su posible aplicación en diferentes contextos. Ante este vacío, la Red de Investigadores sobre las experiencias de inseguridad hídrica en hogares (HWISE RCN) ha diseñado y validado un instrumento, validado transculturalmente, que permite abordar dimensiones físicas y no físicas de esta condición.

La HWISE, diseñada por Young et al. (2019) y expuesta a detalle por la Red del Consejo de Investigación en Inseguridad Hídrica a escala de hogares (HWISE RCN, 2019) está compuesta por 12 preguntas que abordan los siguientes ítems: preocupación, interrupción, (lavado de) ropa, planes, alimentos, (lavado de) manos, cuerpo, agua para beber, enojo, sueño, ninguno y vergüenza. La unidad de observación de la encuesta, al igual que en la EPACA, es el hogar, definida como una unidad que “incluye a todas las personas que duermen bajo el mismo techo y comparten alimentos de la misma olla” (HWISE RCN, 2019, p. 8), y está dirigida al jefe o jefa de hogar (Figuras 1 y 2). En ella, consultamos cuán frecuentemente el encuestado(a) o algún miembro del hogar atravesó por estas situaciones durante las últimas cuatro semanas. Las respuestas están ordenadas en una escala que se corresponde con las opciones “nunca” (0 veces en las últimas cuatro semanas), “rara vez” (1 a 2 veces), “a veces” (3 a 10 veces), “seguido” (11 a 20 veces), y “siempre” (más de 20 veces).

Esta encuesta ha sido aplicada en más de 20 países. En julio del 2019, un equipo de nueve investigadores del Centro de Competencias del Agua (CCA), entre encuestadores y monitoras, aplicó este instrumento por primera vez en Perú como parte del componente 3 (socioeconómico) del Proyecto Fondo Newton - Vínculos institucionales “Fortalecimiento de las capacidades locales para el manejo sostenible de los humedales de cabeceras de cuencas Andinas frente al cambio global”, que desarrolló como caso de estudio el de la Microcuenca Chichlarazo, cuyo ámbito coincide con parte de la Comunidad Campesina de Chuschi.



Figura 1. Dayma Quintas, parte del equipo del CCA, encuestando a un jefe de familia en la plaza mayor del distrito de Chuschi, luego del desfile por Fiestas Patrias. Fuente: Archivo fotográfico del CCA.



Figura 2. Noemí Tomaylla y Mariella Huaycha, parte del equipo del CCA, encuestan a jefas de hogar de la comunidad de Chuschi. Fuente: Archivo fotográfico del CCA.

Área de Estudio

La Comunidad Campesina de Chuschi está ubicada en el distrito homónimo, en la provincia de Cangallo, región Ayacucho (Figura 3). Alberga a más de 700 comuneros y comuneras en total, pero en el ámbito del Chicllarazo o zona sallqa concentra 313 habitantes (entre comuneros y no comuneros) en 106 viviendas (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018). Este ámbito del Chicllarazo está compuesto por las siete localidades o barrios Wacraccocha, Lerqona, Chakiccocha, Pucruhuasi, Yanaccocha, Yupana y Waracco.

De acuerdo con los resultados de Cárdenas et al. (2022), el 91% de los encuestados posee una vivienda secundaria, en la que pasa 12 días al mes en promedio. Este dato es muy relevante para el análisis de resultados de la HWISE, ya que el rango temporal abarca las cuatro semanas previas a la encuesta.

La actividad económica a la que buena parte de los chuschinos se dedican en el Chicllarazo es la ganadería alpaquera y en la que encuentran su principal fuente de ingresos económicos (así lo reportó el 60% de las familias encuestadas). En promedio, cada familia cuenta con 69 alpacas, 8 vacas y 35 ovejas. Si bien es la actividad principal, los ingresos que obtienen por ella están por debajo del salario mínimo vital en Perú, puesto que -según los resultados de la EPACA- percibieron menos de S/. 250 la última vez. En cuanto a los servicios de agua y saneamiento, los 313 habitantes del Chicllarazo cuentan con agua potable en la vivienda y servicio de saneamiento

básico. No obstante, un 30% de los encuestados encuentra en fuentes naturales directas el agua para la preparación de sus alimentos, y el 11% indicó que el agua del caño “tiene mucho cloro” (7%) o “es turbia” (4%) (Cárdenas et al., 2022). Además, hasta octubre del 2019, el agua con fines domésticos en el ámbito del Chicllarazo no era clorada, ya que la Junta Administradora de Servicios y Saneamiento (JASS) todavía estaba en formación. En este contexto, el equipo de investigadores del CCA aplicó la EPACA-IH.

La Aplicación de la HWISE en Chuschi

Previo a la aplicación de la HWISE, se desarrolló una caracterización socioeconómica y de gobernanza de recursos naturales en la Comunidad Campesina de Chuschi, con énfasis en el ámbito de la microcuenca del Chicllarazo. Con ello, se diseñó la EPACA y se integró la HWISE traducida al español (Anexo 1). El 22 de julio se hizo una validación de contenido durante el chaccu, el evento comunal que consiste en la captura y esquila de vicuñas. Las cuatro cédulas aplicadas indicaron la necesidad de una traducción al quechua que capture la finalidad de las preguntas y de las opciones de la escala (nunca, rara vez, a veces, siempre), especialmente del término “rara vez”. Luego, el 26 y 27 de julio, un equipo de siete encuestadores quechuhablantes (cinco mujeres y dos varones), monitoreados por dos personas, aplicaron 79 cédulas. De ellas, solo 70 fueron válidas, debido a que nueve presentaron duplicidad o inconsistencia de información. Los datos fueron registrados en una matriz diseñada en Excel, donde fueron procesados. A continuación, se presentan los resultados del análisis

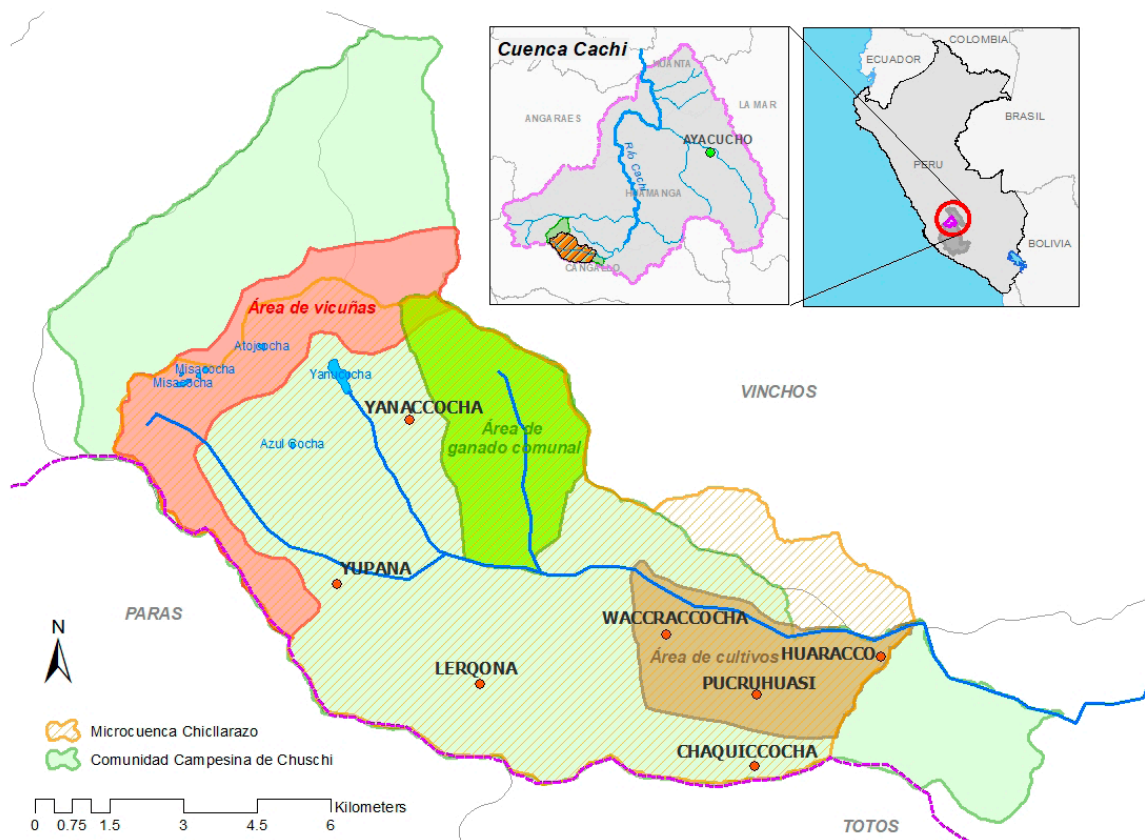


Figura 3. Mapa de ubicación de la Comunidad Campesina de Chuschi. Fuente: Elaboración propia.

descriptivo de la HWISE aplicada en la Comunidad de Chuschi.

Resultados y Discusión

Las Experiencias de Inseguridad Hídrica según Ítem

Entre los ítems de la encuesta que guardan relación con dimensiones no físicas de la inseguridad hídrica, tenemos la preocupación, el enojo, la vergüenza y el sueño (Figura 4). De ellos, la preocupación de no tener suficiente agua aparece como la experiencia más frecuente en las cuatro semanas previas a la aplicación de la encuesta, ya que el 91% manifestó haberse “preocupado de no tener suficiente agua”. Aunque el “enojo” y la “vergüenza” debido a problemas por el agua no fueron experiencias tan frecuentes en comparación con la “preocupación”, el 63% se sintió enojado (por su situación respecto al agua) al menos una vez en las cuatro semanas previas a la aplicación de la encuesta, y el 61% se sintió avergonzado al menos una vez durante el mismo periodo.

Menos frecuente aún es la experiencia de ir a dormir con sed porque no había agua para beber (el 50% de los encuestados señaló que nunca había experimentado esta situación).

De las experiencias relativas a las dimensiones físicas de la inseguridad hídrica en el hogar, la “interrupción o limitación de su principal fuente de agua” es la más frecuente, ya que el 84% de los encuestados señaló haber pasado por esta experiencia, mientras que el 75% de encuestados experimentó la ausencia de agua potable o saludable en su hogar (respuesta “ninguno”) al menos una vez durante el mismo periodo.

Los Hogares con Inseguridad Hídrica en Chuschi

La única localidad donde los hogares, según el puntaje promedio, presentan la condición de seguridad hídrica es Yanacocha (Figura 5). Con relación a la cantidad de hogares por localidad, Pucruhuasi presenta la mayor cantidad de hogares con seguridad hídrica (8 de

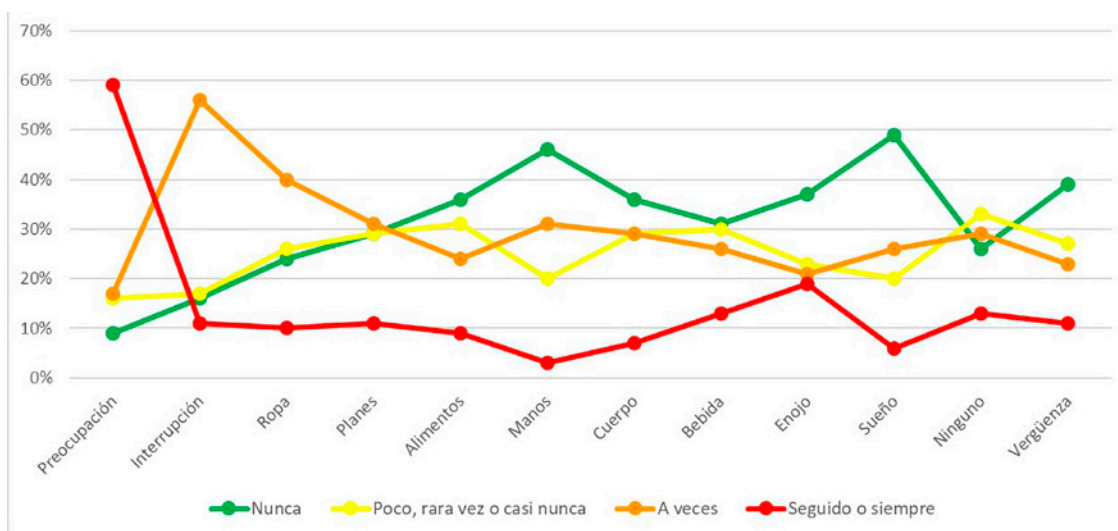


Figura 4. Distribución porcentual de los resultados de la encuesta sobre experiencias de inseguridad hídrica en hogares. Fuente: Base de datos EPACA-IH, 2019.

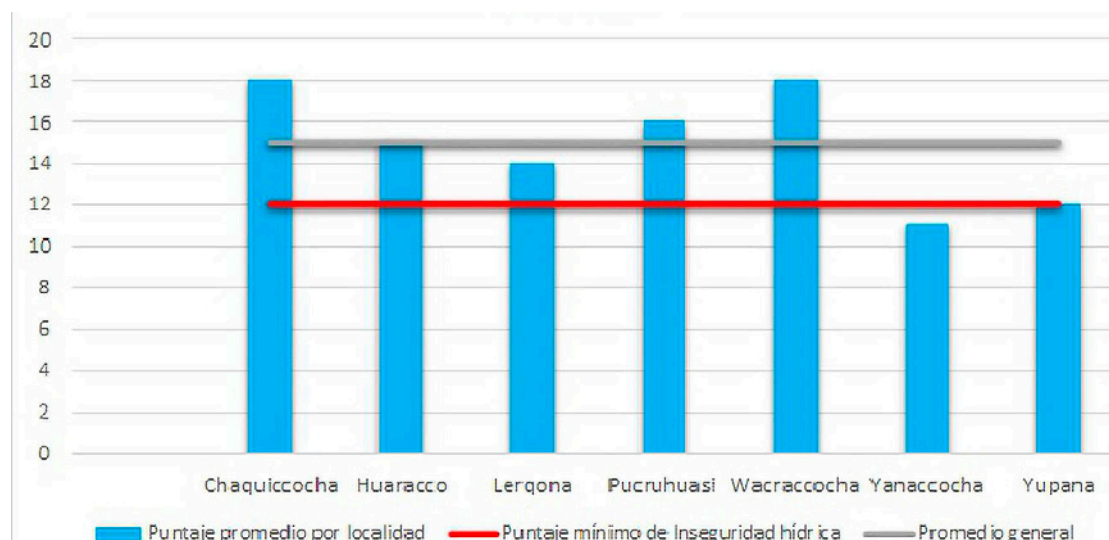


Figura 5. Inseguridad hídrica según puntaje promedio por localidad. Fuente: Base de datos EPACA-IH, 2019.

17), mientras que en Huaracco y Wacraccocha, más del 70% de sus hogares presentan inseguridad hídrica. A nivel comunal, el 64% de los hogares encuestados presentan inseguridad hídrica.

Conclusiones

La doble residencia es un aspecto por considerar en los instrumentos complementarios a la HWISE. El tiempo que los encuestados pasan en la vivienda secundaria es un dato importante antes de emitir conclusiones sobre los lugares donde las experiencias sobre seguridad hídrica son más frecuentes y, por ende, donde se deberían enfatizar acciones que las alivien.

Las experiencias de inseguridad hídrica más frecuentes son aquellas relacionadas con dimensiones no físicas como la preocupación, y físicas como la interrupción o limitación de la principal fuente de agua. Sobre este último ítem, se puede señalar que la cobertura del servicio de agua potable no alivia completamente las experiencias de inseguridad hídrica en Chuschi.

Las localidades donde los encuestados con vivienda principal o secundaria presentan experiencias de inseguridad hídrica con más frecuencia son Wacraccocha y Chaquiccocha. La única localidad que presenta la condición de seguridad hídrica es Yanacocha, donde se ubica la laguna más grande de la comunidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo Newton-Paulet Institutional Links (Contrato N° 225-2018-FONDECYT) por el apoyo económico para el desarrollo de esta investigación. Agradecemos también a Nazia Loayza, Dayma Quintas, Mariela Huaycha, Julián Llanto y Álvaro Ayala, parte del equipo del CCA, y a Álex Gavilán, parte del equipo del Centro de Desarrollo Agropecuario (CEDAP), por su apoyo para la aplicación de la encuesta. Finalmente, agradecemos a la Comunidad de Chuschi, sus autoridades y especialmente a los y las jefes de familia que amablemente accedieron a participar de la encuesta.

Referencias

Cárdenas Maldonado, F., Taboada Hermosa, R., Tomaylla Berrocal, N., Pariona Flores, D. L., Willems, B. y Staddon, C. (2022). Diseño y aplicación piloto de la Encuesta de Presiones Antropogénicas en Cuencas Altoandinas (EPACA). *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 7, pp. xx-xxx.

HWISE RCN (Research Coordination Network). (2019). Household water insecurity experiences scale [HWISE]. User manual. <https://doi.org/10.21985/n2-anbv-v974>

Jepson, W. E., Wutich, A., Collins, S. M., Boateng, G. O. y Young, S. L. (2017). Progress in household water insecurity metrics: A cross-disciplinary approach. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(3), e1214. <https://doi.org/10.1002/wat2.1214>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). DATASS - Modelo para la toma de decisiones en saneamiento. Recuperado el 4 de noviembre de 2019, de <https://datass.vivienda.gob.pe/>

Wutich, A., Budds, J., Eichelberger, L., Geere, J., M. Harris, L. M., A. Horney, J. A., Jepson, W., Norman, E., O'Reilly, K., Pearson, A. L., Shah, S. H., Shinn, J., Simpson, K., Staddon, C., Stoler, J., Teodoro, M. P. y Young, S. L. (2017). Advancing methods for research on household water insecurity: Studying entitlements and capabilities, socio-cultural dynamics, and political processes, institutions and governance. *Water Security*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2017.09.001>

Young, S. L., Boateng, G. O., Jamaluddine, Z., Miller, J. D., Frongillo, E. A., Neilands, T. B., Collins, S. M., Wutich, A., Jepsen, W. E. y Stoler, J. (2019). The Household Water InSecurity Experiences (HWISE) Scale: Development and validation of a household water insecurity measure for low-income and middle-income countries. *BMJ Global Health*, 4(5). <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2019-001750>

Anexo 1. Sección IV de la EPACA-IH o HWISE integrada a la EPACA.

INSEGURIDAD HÍDRICA

Escala para la asignación del puntaje:

NUNCA “MANAN KANCHU”	POCO, RARA VEZ O CASI NUNCA “ASLLA”	A VECES “YANILLAN”	SEGUIDO O SIEMPRE “SAPA KUTY”
0	1	2	3

*Si contesta “No sé”, no se asignará puntaje y solo se colocará un guión (-). En caso el encuestado conteste “No sé”, se debe repreguntar para poder obtener la evaluación completa.

Etiqueta	Ítem (usted o alguien en su familia)	Puntaje
56. Preocupación	En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien en su familia se preocupó de no tener suficiente agua para todas sus necesidades? ¿Kay killa pasaqta llaquikurankichu mana yaku achka kaptin?	
57. Interrupción	En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia se ha interrumpido o limitado su fuente principal de agua (por ejemplo, la presión del agua, menos agua de la esperada, o el río se secó)? ¿Kay killa pasaqta yakuyqui qunqayllamanta chaquimurachu utaq nadallachu qamurqa?	
58. Ropa / Vestimenta	En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia no ha habido suficiente agua para lavar la ropa ? ¿Kay killa pasaqta pacha mayllakunaykipaq manachu achka yakuyki kapusuranki?	
59. Planes	En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien en su familia ha cambiado los horarios o los planes debido a problemas por el agua ? ¿Kay killa pasaqta rurayninta mudarachu yaku sasachakuykaptin? <i>Las actividades que pueden haber sido interrumpidas incluyen cuidar a otros, hacer tareas domésticas, trabajo agrícola, actividades generadoras de ingresos, dormir, etc.</i>	
60. Alimentos	En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien en su familia tuvo que cambiar lo que iba a cocinar porque hubo problemas con el agua (por ejemplo, para lavar alimentos, cocinar, etc.)? ¿Kay killa pasaqta mudarankichu yanukunaykita yaku sasachakuykaptin?	

<p>61. Manos</p>	<p>En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien de su familia ha tenido que dejar de lavarse las manos después de actividades sucias (por ejemplo, defecar o cambiar pañales, limpiar excrementos de animales) debido a problemas con el agua? ¿Kay killa pasaqta manachu makikita mayllakuranqui? (Ispakuruspayki, qacha pañalchanta mudaruspa, guanuta quñuruspa)</p>	
<p>62. Cuerpo</p>	<p>En las últimas cuatro semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien de su familia ha tenido que dejar de lavar su cuerpo debido a problemas con el agua (por ejemplo, no hay suficiente agua, sucia, insegura)? ¿Kay killa pasaqta sasachakuy yakukaptin manañachu cuerpuquita mayllacuranqui?</p>	
<p>63. Bebida</p>	<p>En las últimas 4 semanas, ¿con qué frecuencia no ha habido tanta agua para beber como quisiera para usted o para alguien en su hogar? ¿Kay killa pasaqta qam munasqaykiman qina manuchu achka yaku kara upyanaykipaq?</p>	
<p>64. Enojo</p>	<p>En las últimas 4 semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien de su familia se enojó por su situación con respecto al agua? ¿Kay killa pasaqta pipas piñakurachu yakurayku?</p>	
<p>65. Sueño</p>	<p>En las últimas 4 semanas, ¿con qué frecuencia usted o alguien de su familia se ha ido a dormir con sed porque no había agua para beber? ¿Kay killa pasaqta yakunayasqachu puñuq riranki mana yaku kaptin?</p>	
<p>66. Ninguno</p>	<p>En las últimas 4 semanas, ¿con qué frecuencia no ha habido agua potable o saludable en su hogar? ¿Kay killa pasaqta manachu allin yaku kara wasikipi?</p>	
<p>67. Vergüenza</p>	<p>En las últimas 4 semanas, ¿con qué frecuencia los problemas con el agua hicieron que usted o alguien en su hogar se sintiera avergonzado (mal, excluido)? ¿Kay killa pasaqta pinqakurankichu yaku sasachakuy kaptin?</p>	

Estudio Hidrogeológico del Acuífero Kárstico en el Sector de Pucamarca, Chinchero, Cusco

Hydrogeological Study of the Karstic Aquifer in the Pucamarca Sector, Chinchero, Cusco

Carlos Wiliam Huaman Sucso¹ y Yuosef Gavino Valenzuela Valenzuela²

¹ karlwil666@gmail.com, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

² jeef151090@gmail.com, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

Resumen

El área de estudio se encuentra ubicado en el departamento de Cusco, provincia de Urubamba, distrito de Chinchero, Comunidad de Pucamarca, sobre los 3715 msnm, y está comprendida dentro de la microcuenca Piuray Ccorimarca. En este espacio geográfico se encuentra la quebrada Pucamarca, en la cual existen surgencias de manantes asociados a rocas calizas que son usados para el consumo y riego por la población. Las rocas aflorantes comprenden una gran estructura de un acuífero kárstico, el cual tiene un comportamiento diferente respecto a los acuíferos sedimentarios de la microcuenca Piuray Ccorimarca. En la zona de estudio, se encuentran asociados depósitos cretácicos con composición de lutitas y yesos con baja permeabilidad, en partes cubriendo a calizas fracturadas y plegadas, conformando de esta manera un paisaje kárstico. Ante el principal problema de la escasez de agua para el consumo y riego, surge la necesidad de realizar infraestructuras de almacenaje y/o recarga adecuadas para este tipo de litología, a fin de mejorar la disponibilidad y aumentar la resiliencia ante épocas de estiaje y futuros problemas con que amenaza el cambio climático. Por ello, es necesario conocer las características geológicas, estructurales, hidrogeológicas del área. Para obtener información del subsuelo, será necesario ejecutar métodos indirectos de prospección geofísica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), que permitan conocer características como el comportamiento geométrico a profundidad, niveles freáticos, grado de fracturación y otros componentes de la estructura del acuífero kárstico fisurado, a fin de conocer los lugares por donde exista circulación de agua.

Palabras clave: *Hidrogeología, acuífero kárstico, tomografía eléctrica*

Abstract

The study area is located in the Cusco department, Urubamba province, Chinchero district, community of Pucamarca, at 3715 m a.s.l., and is included in the Piuray Ccorimarca microbasin. In this geographical space is the Pucamarca ravine, in which there are springs associated with limestone rocks that are used for consumption and irrigation by the population. The outcropping rocks comprise a large structure of a karstic aquifer, which has a different behavior with respect to the sedimentary aquifers of the Piuray Ccorimarca microbasin. In the study area, there are associated Cretaceous deposits with a composition of shale and gypsum with low permeability, in parts covering fractured and folded limestone, thus forming a karstic landscape. Faced with the main problem of water scarcity for consumption and irrigation, the need arises to create suitable storage and/or recharge infrastructures for this type of lithology, in order to improve availability and increase resilience in times of drought and future problems that climate change threatens. Therefore, it is necessary to know the geological, structural, hydrogeological characteristics of the area. To obtain information on the subsoil, it will be necessary to carry out indirect methods of geophysical prospecting of Electrical Resistivity Tomography (ERT), which allow knowing characteristics such as the geometric behavior at depth, phreatic levels, degree of fracturing and other components of the structure of the fissured karstic aquifer, in order to know the places where there is water circulation.

Keywords: *Hydrogeology, karstic aquifer, electric tomography*

Introducción

El presente trabajo de investigación se refiere al estudio hidrogeológico del acuífero kárstico que geológicamente está comprendido dentro del Grupo Yuncaypata, correspondiente a las formaciones Maras y Ayabacas de edad Albiana del Cretácico (Carlotto, Cárdenas y Carlier, 2011). El área de investigación presenta varias unidades litológicas como arcillas, lutitas, yesos y calizas. Estos materiales se encuentran en disposición caótica a causa del diapirismo y el tectonismo, y van deformando y produciendo plegamiento y fracturamiento en las calizas. Como producto de todos estos componentes y procesos a través del tiempo, se conforma un acuífero kárstico con surgencias de manantes permanentes y temporales a lo largo de la quebrada Pucamarca, los mismos que son utilizados para el consumo humano y el riego de cultivos del sector Pucamarca.

Ante la creciente demanda del recurso hídrico, estos manantes producen limitada cantidad, en especial en épocas de estiaje, por lo que la población prioriza el uso para el consumo humano, viéndose la necesidad de mejoramiento con infraestructuras de captación, almacenaje o métodos de recargas de los acuíferos kársticos.

Para conocer el comportamiento del sistema del acuífero, se hizo una caracterización geológica y geomorfológica de unidades estratigráficas y estructurales, un monitoreo de los manantes y ensayos de permeabilidad y de tomografía eléctrica.

Materiales y Métodos

Para la recopilación, análisis y procesamiento de los datos de la investigación, se utilizaron los siguientes materiales y metodología.

Equipos y Materiales:

Estación total, GPS diferencial, imagen satelital, medidor multiparámetro, brújulas, tomógrafo eléctrico y permeámetros.

Investigaciones de Campo:

- Puntos geodésicos y topografía a detalle,
- Cartografiado geológico y estructural,
- Aforo y recopilación de datos fisicoquímicos de manantes,
- Ensayos de permeabilidad de suelos y rocas,
- Ensayos geofísicos de tomografía de resistividad eléctrica (ERT).

Gabinete:

Procesamiento y análisis de información recopilada en software (SIG), CAD, Global Mapper, Google Earth, SAS Planet y Geogiga Rimager.

Resultados

Geología y Estructura

En la delimitación de la quebrada (Figura 1), bordeada por una línea roja, se encuentran la Formación Ayabacas del Albiano superior hasta el Turoniano (Carlotto, Cárdenas y Carlier, 2011), representada en color oscuro, como cuerpos deformados, asociados a la formación Maras (color anaranjado), los cuales están compuestas por lutitas, yesos y bloques de caliza. A esta unidad, Carlotto, Cárdenas y Carlier (2011, p. 29) la describe como de edad albiana media. Los afloramientos de la Formación Ayabacas presentan variados espesores, con un promedio de 30 hasta 100 metros, plegadas intensamente y debido a ello con intensidad de fracturamiento alto, en partes aparecen en forma de brechas angulosas. Se describe que estas diferencias se deben a la presencia de fallas normales sinsedimentarias y slumps. Los niveles de brechas sugieren que el relieve era ligeramente accidentado y que durante la sedimentación ocurrían deslizamientos (Carlotto-Caillaux, 1992). Esto explicaría la forma como se encuentran estos afloramientos. La Formación Maras, estratigráficamente, está debajo de la Formación Ayabacas, pero esta presenta densidades menores a las de las rocas, produciendo diapirismos y deformando parte de las rocas. Dicha litología también forma parte del diapiro de Maras (Centro Guaman Poma de Ayala, 2013).

La geología está controlada por una falla inversa Piuray, en dirección SE-NW, donde las formaciones Maras y Ayabacas sobreyacen a rocas de las formaciones Quilque, Chilca y Puquín, delimitando así el acuífero kárstico Pucamarca.

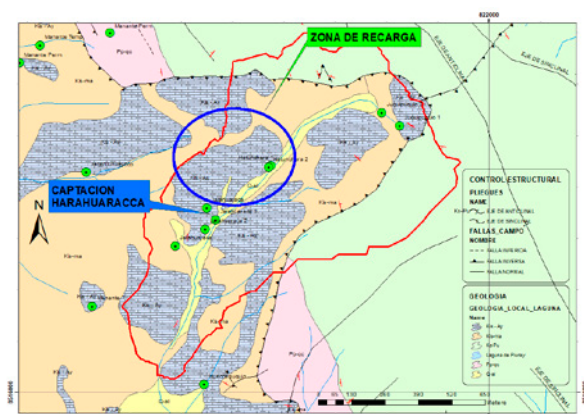


Figura 1. Unidades geológicas y estructurales del acuífero kárstico Pucamarca. Fuente: Elaboración propia.

Manantes

Para poder conocer la dinámica de la carga y recarga, se hizo la evaluación de parámetros fisicoquímicos (Tabla 1) y de caudales (Tabla 2) en épocas de estiaje y avenidas, a fin de tener la diferencia de valores en ambas etapas en toda el área de investigación y alrededores.

De acuerdo con los datos mostrados en Tablas 1 y 2, los manantes presentan una variación significativa directamente proporcional a las precipitaciones y, más aún, con los datos tomados en el año 2013, los cuales son típicos de acuíferos kársticos con un comportamiento estacional (Pulido, 2015). Asimismo, están caracterizados como manantiales episódicos o efímeros por Andreu et al. (2016), quienes los define como aquellos que aparecen cuando el acuífero experimenta un notable ascenso del nivel piezométrico a causa de episodios lluviosos (2016, pág. 76)

Parámetros Fisicoquímicos

Tabla 1. Tabla de parámetros fisicoquímicos del acuífero kárstico Pucamarca.

Datos			Coordenadas UTM		Parámetros Fisicoquímicos													
TIPO	NOMBRE	LUGAR	ESTE	NORTE	Temperatura [°C]	pH	EC [µS/cm]	TDS [ppm]	Salinidad [psu]	DO [ppm]	DO [%]	mV [pH]	ORP [mV]	RES [Ohm-cm]	FECHA			
Manante-1	Tancarpujio	Huitapugio	819572	8515515	15.22	7.24	1554	777	0.789	0.16	2.4	-9.4	272.7	644	3/05/2019			
Captación-1	Juqupuquiuo 1	Pucamarca	821655	8517038	12.23	7.09	590	295	0.288	0.17	2.5	4.4	111.9	1695	23/02/2019			
Captación-2	Juqupuquiuo 2	Pucamarca	821585	8517089	12.44	6.95	642	321	0.315	2.26	34.1	6.7	206.6	1558	2/03/2019			
Captación-3	Hatunchara 1	Pucamarca	821153	8516883	13.01	7.25	519	260	0.253	0.44	6.7	-4.4	208.7	1927	23/02/2019			
Captación-4	Hatunchara 2	Pucamarca	821143	8516876	13.07	7.16	506	253	0.246	0.49	7.4	0.8	177.8	1976	23/02/2019			
Captación-5	Jarahuaraca 1	Pucamarca	820936	8516673	12.48	7.18	489	244	0.238	0.4	6.0	-0.4	256.2	2045	23/02/2019			
Captación-6	Jarahuaraca 2	Pucamarca	820896	8516637	13.03	7.32	805	403	0.398	0.42	6.3	-8.1	252.7	1242	23/02/2019			
Captación-7	Cococorocho	Huitapugio	820113	8516092	13.58	7.53	461	231	0.224	5.03	75.7	-2.5	310.8	2169	2/03/2019			
Captación-8	Chitapujio	Huitapugio	819580	8516061	12.48	7.18	489	244	0.238	0.4	68.6	-4.3	278.1	2045	2/03/2019			
Captación-9	Huecospuquiuo	Pucamarca	820892	8516032	12.36	7.5	388	194	0.188	0.46	6.7	-23.3	270.7	2577	3/05/2019			
Manante-2	Jacclluhuaycco	Tambocancha	820432	8516858	11.48	7.74	322	161	0.155	0.49	7.1	-36.4	270.9	3106	3/05/2019			
Manante-3	Chilcapuquiuo	Pucamarca	820271	8515722	13.58	7.33	1232	616	0.619	0.54	8.1	-14	278.8	812	3/05/2019			

Tabla 2. Aforo de manantes durante el año 2018 y datos tomados en 2013 (Centro Guaman Poma de Ayala, 2013).

TIPO	Coordenadas UTM		NOMBRE	LUGAR	Guaman Poma de Ayala		Datos tomados durante la investigación				DIFERENCIA DE Q
	X	Y			CAUDAL (l/s)	FECHA	CAUDAL (l/s)	FECHA	CAUDAL (l/s)	FECHA	
Manante-1	819572	8515515	Tancarpujio	Ayllopongo	3.5	23/02/2013	0.1	3/05/2019	0.13	30/08/2019	0.03
Captación-1	821655	8517038	Juquipuquio 1	Pucamarca	0.48	24/02/2013	0.51		0.075	24/08/2019	0.435
Captación-2	821585	8517089	Juquipuquio 2	Pucamarca			0.09		0.003	24/08/2019	0.087
Captación-3	821153	8516883	Hatunchara 1	Pucamarca	0.55	26/02/2013	0.38	23/02/2018	0.046	24/08/2019	0.334
Captación-4	821143	8516876	Hatunchara 2	Pucamarca	0.33	27/02/2013	0.15	23/02/2018	0.033	24/08/2019	0.117
Captación-5	820936	8516673	Jarahuaraca 1	Pucamarca			0.72	23/02/2018	0.11	24/08/2019	0.61
Captación-6	820896	8516637	Jarahuaraca 2	Pucamarca	1.05	1/03/2013	0.77	23/02/2018	0.78	30/08/2019	0.01
Captación-7	820113	8516092	Cocorocho	Huitapugio			0.21		0.037	24/08/2019	0.173
Captación-8	819580	8516061	Chitapujio	Huitapugio	0.54	3/03/2013	0.16				0.16
Captación-9	820892	8516032	Huecospuquio	Pucamarca			0.29	3/05/2019	0.024	24/08/2019	0.266
Manante-3	820432	8516858	Jacacillhuaycco	Tambocancha	1.5	5/03/2013	0.01	3/05/2019	0.007	24/08/2019	0.003
Captación-10	820101	8516570	Ccotopupiuo	canu	1.58	6/03/2013	cerrado	3/05/2019			
Manante-4	820271	8515722	Chilcapuquio	Pucamarca	5	7/03/2013	1.65	3/05/2019	0.656	30/08/2019	0.994

Sin embargo, la Captación-6 de la Tabla 2 muestra una periodicidad constante en el año 2018, que adquiere un comportamiento perenne o permanente (Andreu et al., 2016). Esta captación es aprovechada por la población durante todo el año, ya que presenta un caudal significativo y está dentro de la quebrada Pucamarca. Por encima de esta captación, se encuentran afloramientos de calizas fracturadas intensamente con rellenos de permeabilidad considerable ($k = 1.93E-2$), pero en comparación con los datos que fueron medidos en 2013 de 1.05 l/s, la diferencia es grande. Por tal motivo, sería necesario realizar métodos de recarga artificial con aprovechamiento de aguas de lluvia en zonas de mayor grado de fracturamiento.

El Manante-1 presenta un caudal constante con una diferencia menor, pero se encuentra en la llanura lacustre muy cerca de la laguna y a menor altitud que la población, por lo cual solo es aprovechada para el riego de cultivos muy cercanos.

Geofísica

Los ensayos de tomografía por arreglos Wenner-Schlumberger (Figura 2) muestran zonas de circulación de aguas subterráneas a través del acuífero kárstico en dirección hacia la laguna Piuray. Están relacionadas geoméricamente a la surgencia de los manantes descritos. La Captación-6, de nombre Jarahuaraca, cuyo caudal es constante, se manifiesta en la tercera sección de

tomografía, donde se encuentra por encima de la zona saturada a una profundidad aproximada de 25 metros. El lado derecho muestra resistividades altas de hasta 2800 ohmios-metro que corresponden a rocas calizas, mostrando hasta una profundidad de 80 metros.

La Sección 4 (Figura 2) se realizó sobre depósitos de la Formación Maras y muestra zonas saturadas a una profundidad de 30 metros, las cuales siguen un patrón de circulación en dirección de la laguna.

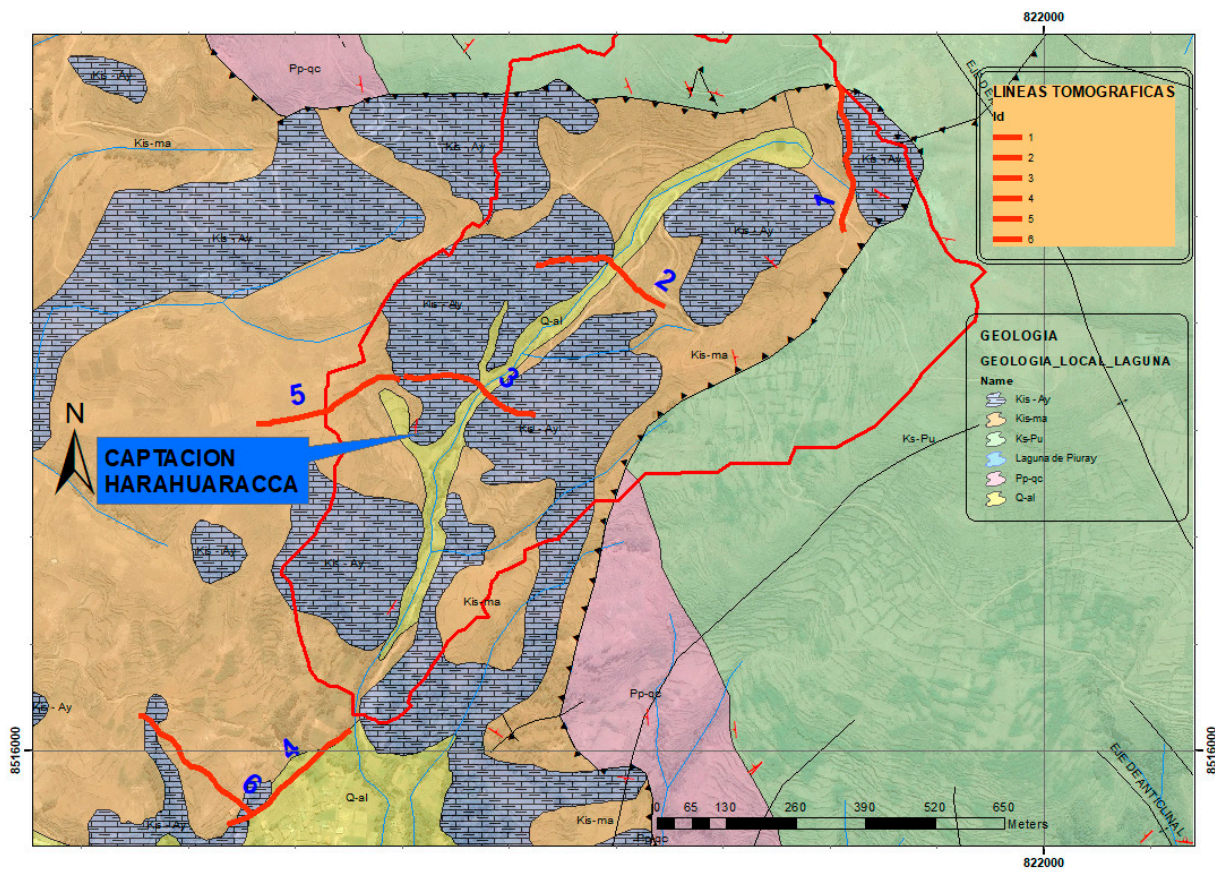
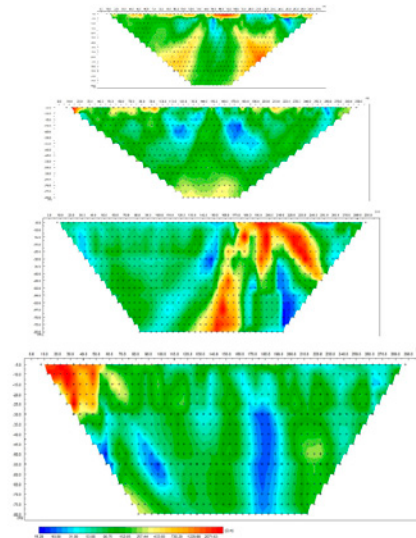


Figura 2. Ubicación de las líneas y secciones de tomografía eléctrica perpendiculares a la quebrada Pucamarca. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones Preliminares

El acuífero kárstico Pucamarca está conformado por formaciones geológicas de Maras y Ayabacas de edad Albiana del Cretácico, que presentan espesores de hasta 100 metros, con zonas de alto grado de fracturamiento y rellenos permeables, los cuales pueden ser aprovechados para realizar métodos de recarga artificial con el aprovechamiento de aguas de lluvia en épocas de avenidas.

De acuerdo con el aforo de los manantes y captaciones, estos en su mayoría son de carácter estacional, relacionados directamente con periodos lluviosos, siendo recargados por las fisuras, y estas se infiltran alimentando a cada uno de los manantes y captaciones. Para ello, se identificó una zona de mayor grado de fracturamiento por encima de la Captación-6 llamada Harahuaraca para realizar métodos de recarga artificial.

Con los resultados de tomografía eléctrica, se identificaron zonas de saturación y circulación de agua en profundidades de hasta 30 metros con dirección hacia la laguna Piuray. Estas zonas de circulación de agua alimentan a los manantes y captaciones de la quebrada Pucamarca.

Agradecimientos

La presente investigación viene siendo realizada en el marco del proyecto “Adaptación de la gestión de recursos hídricos al cambio climático”, con el financiamiento de The Natural Conservancy (TNC) y desarrollada por el Centro de Estudios Bartolomé de las Casas y por BMU Alemania.

Referencias

- Andreu, J. M., Andreo, B., Cortés, J. M., Cuchí, J. A., Mateos, R. M. y Pérez, J. J. (2016). Los manantiales kársticos. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 24(1), 74-87.
- Carlotto, V., Cárdenas, J. y Carlier, G. (2011). Geología del cuadrángulo de Cusco, Hoja 28-s, Escala 1:50,000. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 138. Lima, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Carlotto-Caillaux, V. (1992). Relations entre sédimentation, paléogéographie et tectonique dans la région du Cuzco (sud du Pérou) entre le Jurassique supérieur et le Paléocène. Mémoire de DEA, Université de Grenoble I: Géodynamique.00
- Centro Guaman Poma de Ayala. (2013). Plan de gestión de recursos hídricos de la microcuenca de la laguna de Piuray. Cusco.
- Pulido Bosch, A. (2015). Principios de hidrogeología kárstica. Almería, Editorial Universidad de Almería.

Variabilidad Climática en el Glaciar Artesonraju Explicada en Isótopos de ^{18}O y ^2H

Climatic Variability in the Artesonraju Glacier Explained in Isotopes of ^{18}O and ^2H

Lihan del Rocio Hoyos Zarzosa^{1,2*}, Luzmila Rosario Dávila Roller¹, Ibeth Celia Rojas Macedo^{1,3}

¹ Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Huaraz

² Facultad de Ciencias del Ambiente (FCAM), Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), Huaraz

³ Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima

* lia.dr.hz@gmail.com

Resumen

Los mares y océanos contienen las mayores concentraciones de isótopos del agua (molecularmente H_2O). Los cambios en la temperatura del aire influyen en la evaporación de la superficie marina, dando lugar a variaciones en la concentración isotópica del agua en la atmósfera. Estos isótopos son transportados a través del viento y depositados sobre masas glaciares por las precipitaciones. Los eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), cambios en la temperatura y la precipitación ocasionan impactos sobre los glaciares, algunos de los cuales se evidencian en el equivalente de agua acumulada y en la concentración de isótopos estables del agua (deuterio- ^2H y oxígeno ^{18}O).

A fin de estudiar la variabilidad climática en el glaciar Artesonraju (Cordillera Blanca, Ancash, Perú), se extrajo un núcleo de hielo muy cerca de la línea de equilibrio glaciar (ELA) con un registro de 10 años hidrológicos. En cada capa anual, se determinó la concentración de ^2H y ^{18}O . Los resultados obtenidos concuerdan con la investigación de Mook (2000) respecto a la variación del ^2H y ^{18}O en relación del clima. A diferencia de periodos con mayor precipitación, los periodos más cálidos presentan menores valores de equivalente de agua y mayores concentraciones de ^2H y ^{18}O , pues, si bien es cierto que en los periodos secos las precipitaciones son menores, estas están enriquecidas en ^2H y ^{18}O .

La circulación atmosférica regional impulsada por el ENSO en la zona para el periodo de estudio está claramente evidenciada en El Niño 2015-2016, La Niña 2010-2011 y 2011-2012 (ONI index) desarrollados en la Zona 3.4, presentando una mayor/menor concentración de ^{18}O y ^2H , intensificación/descenso de la temperatura, reducción/incremento de la precipitación y acumulación de equivalente de agua, respectivamente. Del análisis estadístico, el ^{18}O resultó el mejor proxy paleoclimático en términos de precipitación y temperatura anual.

Palabras clave: Variabilidad climática, glaciar, isótopo ^2H , isótopo ^{18}O , ENSO

Abstract

The seas and oceans contain the highest concentrations of water isotopes (molecularly H_2O). Changes in air temperature influence evaporation from the sea surface, leading to variations in the isotopic concentration of water in the atmosphere. These isotopes are transported through the wind and deposited on glacial masses by precipitation. The events of El Niño-Southern Oscillation (ENSO), changes in temperature and precipitation cause impacts on glaciers, some of which are evidenced in the equivalent of accumulated water and in the concentration of stable isotopes of water (deuterium- ^2H and oxygen ^{18}O).

In order to study the climatic variability in the Artesonraju glacier (Cordillera Blanca, Ancash, Peru), an ice core was extracted very close to the glacial equilibrium line (ELA) with a record of 10 hydrological years. In each annual layer, the concentration of ^2H and ^{18}O was determined. The results obtained agree with the research of Mook (2000) regarding the variation of ^2H and ^{18}O in relation to climate. Unlike periods with higher precipitation, the warmer periods present lower values of water equivalent and higher concentrations of ^2H and ^{18}O , because, although it is true that in dry periods precipitation is less, it is enriched in ^2H and ^{18}O .

The regional atmospheric circulation driven by ENSO in the area for the study period is clearly evidenced in El Niño 2015-2016, La Niña 2010-2011 and 2011-2012 (ONI index) developed in Zone 3.4, presenting a greater/lower concentration of ^{18}O and ^2H , intensification/decrease in temperature, reduction/increase in precipitation and accumulation of water equivalent, respectively. From the statistical analysis, ^{18}O was the best paleoclimatic proxy in terms of precipitation and annual temperature.

Keywords: Climate variability, glacier, ^2H isotope, ^{18}O isotope, ENSO

Introducción

La variabilidad climática tiene efecto sobre los glaciares, lo cual es difícil de determinar, aún con una amplia data climática. Sin embargo, el estudio de testigos de hielo constituye un importante registro. Así, Zhao et al. (2012) mencionan que el contenido isotópico del agua en la nieve se correlaciona de manera directa con la temperatura e inversa con las tasas de acumulación. El glaciar Artesonraju (Cordillera Blanca, Ancash) representa un importante recurso para las comunidades de su ámbito, por lo que es importante conocer cómo influye la variabilidad climática sobre este. La presente investigación tiene por objetivo estudiar los efectos de la variabilidad climática en el glaciar Artesonraju.

Metodología

El análisis de la variabilidad climática se enmarca en la evaluación de la concentración de isótopos estables de agua (^{18}O y ^2H), de parámetros meteorológicos y de eventos ENSO. Mediante una perforadora KOVACK, se extrajo un núcleo de hielo, obteniéndose un registro de 10 años hidrológicos. Se tomó el peso y la longitud de cada capa anual para determinar la densidad y, posteriormente, el equivalente de agua acumulada. Asimismo, se determinó la concentración de isótopos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) por

año hidrológico. Los datos meteorológicos empleados corresponden a las estaciones meteorológicas ubicadas en el glaciar Artesonraju, administrada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y fueron completados mediante la información de libre acceso del Portal Giovanni-NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/?#service=TmAvMp&starttime=&endtime=>). Los eventos ENSO en la Zona 3.4 se determinaron mediante el índice ONI (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Finalmente, se analizaron los resultados y se elaboró un mapa con la distribución isotópica de ^{18}O , cuya ecuación fue calculada previamente. El periodo de año hidrológico considerado para el estudio es de agosto a julio (Figura 1).

Resultados y Discusión

Del núcleo de hielo extraído, se espera una reducción de la porosidad de la muestra en función directa a la profundidad, consecuentemente, las capas de hielo deberían progresivamente incrementar su densidad. Sin embargo, los años hidrológicos comprendidos entre 2011-2012 al 2014-2015 revelan una ligera desviación a esta premisa, cuya causa podría ser una fractura en estas capas u otros procesos. No obstante, el resultado obtenido del

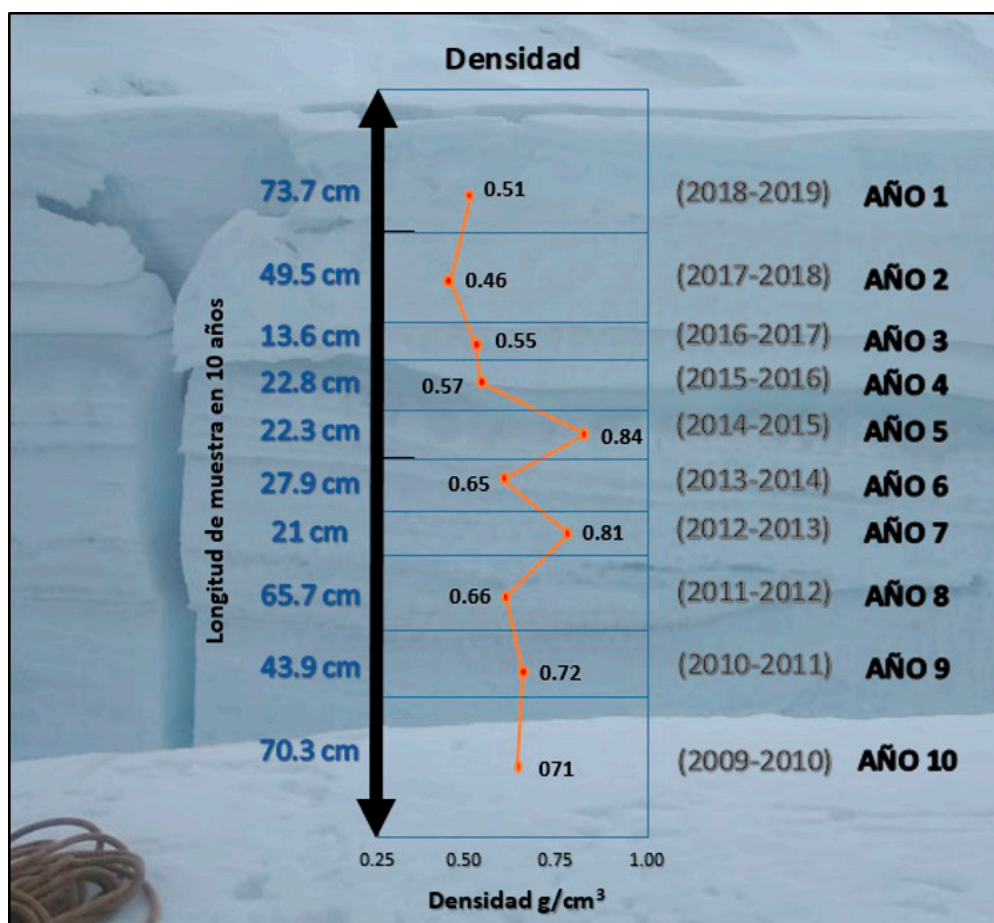


Figura 1. Densidades del perfil de 10 años hidrológicos. Fuente: Elaboración propia.

núcleo de hielo completo demuestra una clara evidencia de que las capas superiores presentan una menor densidad en relación con las capas inferiores.

A lo largo del periodo de estudio, los picos más altos de la temperatura coinciden con los eventos de El Niño 2015-2016, mientras que los picos más bajos coinciden con periodos de La Niña 2010-2011 y 2011-2012. En general, la tendencia de la temperatura para el período de estudio es ascendente.

Con respecto a la precipitación, los mayores valores corresponden a los periodos de La Niña (2010-2011 y 2011-2012), mientras que su menor valor se presenta durante el fenómeno de El Niño (2015-2016), y su tendencia para el periodo de estudio es decreciente.

Los eventos ENSO tienen influencia sobre la circulación atmosférica regional y, consecuentemente, sobre el glaciar Artesonraju. Esto se confirma en la cantidad de equivalente de agua obtenida para cada año hidrológico en el presente estudio. Durante un fenómeno de El Niño, se tiene una menor cantidad de equivalente de agua debido a que, durante estos episodios, la temperatura tiende a incrementarse y la precipitación a reducirse, ocasionando una menor acumulación de nieve en el lugar de extracción de muestra. Todo lo contrario ocurre durante un evento del fenómeno de La Niña. Del testigo de hielo, cada año hidrológico (cada capa) representa el resultado de los efectos de la variabilidad climática en la zona de estudio. En la Figura 2, el 2015-2016 (El Niño en la Zona 3.4) presenta una de las menores cantidades de equivalente de agua. Sin embargo, se tiene un menor valor de agua equivalente en el año hidrológico 2016- 2017 que, posiblemente, podría

corresponder al Niño Costero 2016-2017 (El Niño en la Zona 1+2), por lo que sería necesario profundizar el estudio. Por otro lado, durante el fenómeno de La Niña 2010-2011 y 2011-2012, los valores de agua equivalente están comprendidos entre las mayores cantidades de equivalente de agua.

Para el estudio realizado, la variación de la concentración de los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ tiene una relación directa con la temperatura e inversa con la precipitación y el equivalente de agua acumulada. Se observa en la Figura 2 que las variaciones de las concentraciones isotópicas fluctúan de forma similar a los parámetros climáticos. Por lo tanto, al aumentar la temperatura también se incrementan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, mientras que los valores de precipitación disminuyen. Esto se pudo observar a lo largo del periodo estudiado a excepción del año hidrológico 2009-2010. Por otro lado, la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ durante un fenómeno de El Niño es menos negativa (representa una mayor concentración), debido a que durante estos periodos la tasa de evaporación en el Pacífico (Zona 3.4) se incrementa, introduciendo mayores cantidades de isótopos estables del agua en la atmósfera, los que son desplazados por el viento a diversos lugares del planeta y algunos de ellos alcanzan los glaciares. Los valores más altos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se presentan durante el fenómeno de El Niño (2015-2016), coincidiendo con el valor más alto de la temperatura, con el valor más bajo de la precipitación y con uno de los valores más bajos del equivalente de agua acumulada. Un proceso inverso ocurre durante el fenómeno de La Niña (2010-2011 y 2011-2012), manifestado en valores más bajos de temperatura, valores más altos de precipitación y valores más bajos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$.

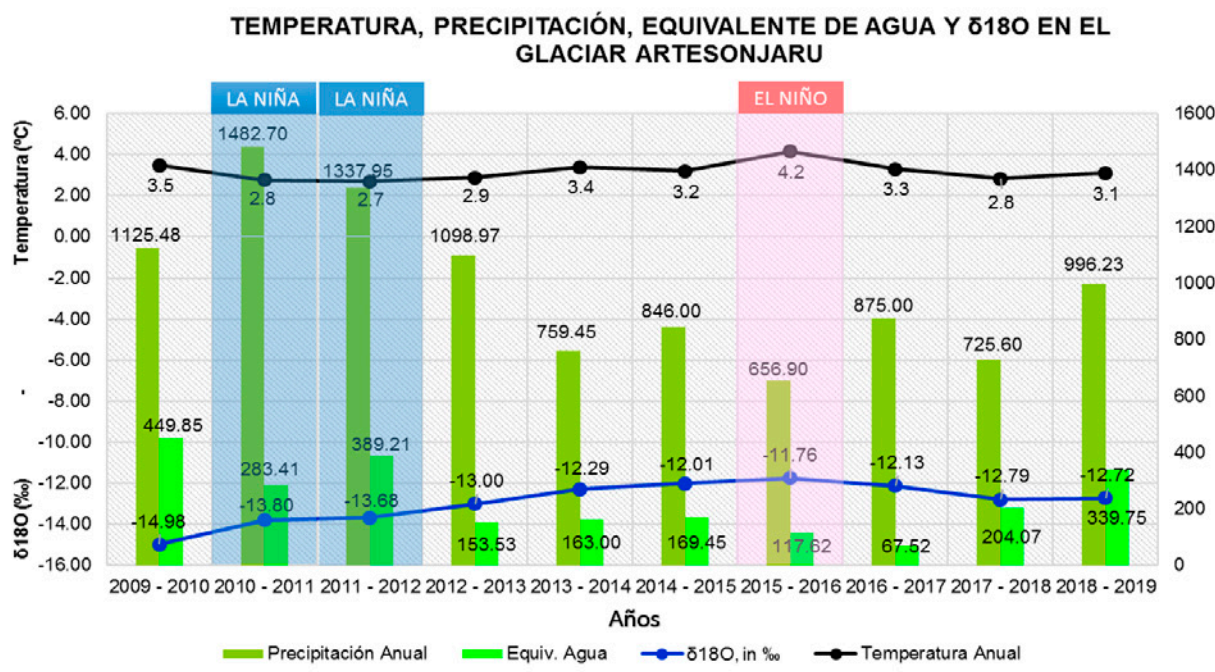


Figura 2. Variación de temperatura, precipitación, equivalente de agua y $\delta^{18}\text{O}$ en el glaciar Artesonraju. Fuente: Elaboración propia

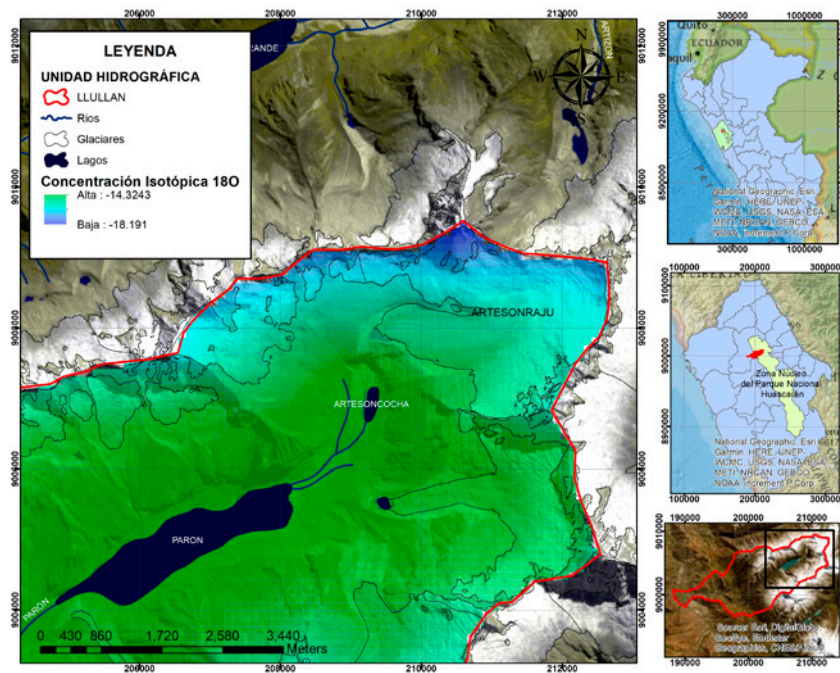


Figura 3. Distribución en altitud de $\delta^{18}\text{O}$ para el glaciar Artesonraju. Fuente: Elaboración propia.

El $\delta^{18}\text{O}$ mostró un 37% de correlación con la temperatura, -73% con la precipitación y -85% con el equivalente de agua acumulada. Para el caso del $\delta^2\text{H}$, el grado de correlación con la temperatura es 31%; con la precipitación, -71% y con el equivalente de agua acumulada, -81%. Se deduce así que, para la zona de estudio, el mejor proxy paleoclimático es el $\delta^{18}\text{O}$.

La distribución, respecto a la altitud, de $\delta^{18}\text{O}$ en la zona de estudio (Figura 3), evidencia que en altitudes más bajas (salida Laguna Parón; 4157 m s.n.m.) la concentración es mayor y que hacia los glaciares (Artesonraju; 5905 m s.n.m.) las concentraciones van disminuyendo.

Conclusiones

Para el periodo de estudio, las temperaturas anuales tienen una tendencia ascendente y las precipitaciones, tendencias descendentes. Adicionalmente, las temperaturas fueron más altas y las precipitaciones más bajas durante el fenómeno de El Niño y, durante el fenómeno de La Niña, se manifiestan temperaturas más bajas y precipitaciones más altas.

La muestra de hielo obtenida explica que las capas superiores (copos de nieve y nieve granular) presentan una menor densidad, mientras que las capas más profundas tienen una mayor densidad, obedeciendo a un proceso de formación del hielo.

Una mayor tasa de evaporación origina un incremento de isótopos estables de agua en la atmósfera, manifestándose también en un incremento de estos en la zona de estudio. Esta afirmación se valida en términos de variabilidad climática, ya que durante eventos El Niño, debido al incremento de la temperatura de la superficie del

mar (mayores tasas de evaporación), la concentración de isótopos es mayor, y durante eventos La Niña (menores tasas de evaporación), se obtienen menores concentraciones de ^{18}O y ^2H .

Los valores obtenidos de equivalente de agua acumulada explican los impactos de eventos ENSO sobre los glaciares; es decir, en un periodo del fenómeno de El Niño (desarrollado en la Zona 3.4), se observan menores valores de equivalente de agua debido al incremento de la temperatura y a la disminución de la precipitación. Sucede un proceso inverso durante periodos del fenómeno de La Niña, en los que los valores de equivalente de agua son mayores.

Del análisis estadístico, se concluye que el ^{18}O es el mejor proxy paleoclimático en términos de precipitación y temperatura anual.

Agradecimientos

El presente proyecto de investigación se desarrolló en el marco del proyecto PANT_Bioglaciar financiado por el Banco Mundial a través del FONDECYT.

Referencias

Mook, W. G. (Ed.) (2000). Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications. Vol. 1 – Introduction: Theory, methods, review. IHP-V Technical Documents in Hydrology, 39(1). Paris, International Hydrological Programme, UNESCO.

Zhao, H., Xu, B., Yao, T., Wu, G., Lin, S., Gao, J. y Wang, M. (2012). Deuterium excess record in a southern Tibetan ice core and its potential climatic implications. *Climate Dynamics*, 38(9-10), 1791-1803.

Análisis de las Variables Atmosféricas y Modelamiento del Balance de Energía para el Glaciar Artesonraju

Analysis of Atmospheric Variables and Modeling of the Energy Balance for the Artesonraju Glacier

Christian Torres^{1,2}, Jorge Arigony^{2,3}, Tobias Sauter⁴, Anselm Arndt⁵, Wolfgang Gurgiser⁶, Wilson Suarez⁷, Nelson Santillan⁸, Éder Maier¹

¹ Laboratório de Climatologia e Cartografia, Universidade Federal do Rio Grande, Brasil (christian010194@gmail.com)

² Laboratório de Monitoramento da Criosfera, Universidade Federal do Rio Grande, Brasil

³ Department of Environmental Sciences, Macquarie University, Australia

⁴ Institute of Geography, Friedrich-Alexander-University Erlangen Nürnberg, Alemania

⁵ Geography Department, Humboldt-Universität zu Berlin, Alemania

⁶ Department of Atmospheric and Cryospheric Sciences, University of Innsbruck, Austria

⁷ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú

⁸ Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas, Autoridad Nacional del Agua, Perú

Resumen

Los glaciares en los Andes peruanos juegan un papel importante para la hidrología local. Para explicar el retroceso acelerado de los glaciares peruanos, es importante primero conocer las principales variables atmosféricas que interactúan con la superficie del glaciar, a fin de evaluar el balance de energía glaciar-atmósfera. En este estudio, analizamos las variables atmosféricas colectadas por una estación meteorológica automática a una resolución horaria y calculamos el balance de energía superficial (SEB) con un modelo recientemente actualizado de balance de energía y masa basado en procesos físicos y acoplado a la capa de nieve y hielo en Python (COSIPY) en su versión distribuida espacialmente en dos dimensiones para el glaciar Artesonraju, localizado en los Andes peruanos, desde 2016 hasta 2018. En COSIPY, todos los componentes del SEB son parametrizados fiscalmente a excepción de la radiación solar de onda corta incidente, que se mide directamente. Las condiciones promedio de las variables atmosféricas fueron: temperatura del aire 1.93 ± 0.83 °C, humedad relativa 74 ± 18 %, velocidad del viento 3.58 ± 2.47 m s⁻¹, la presión atmosférica 745 hPa y la precipitación acumulada 1740 mm. La entrada de energía en todo el glaciar es dominada durante todo el año por la radiación neta de onda corta ($+ 80$ W m⁻²), seguido por el flujo de calor en la subsuperficie ($+ 19$ W m⁻²) y el flujo turbulento de calor sensible ($+ 7$ W m⁻²), mientras que la disponibilidad de energía en el glaciar es consumida por la radiación neta de onda larga ($- 65$ W m⁻²) y el flujo turbulento de calor latente ($- 15$ W m⁻²).

Palabras clave: *Balance de energía, variables atmosféricas, glaciar Artesonraju*

Abstract

Glaciers in the Peruvian Andes play an important role for local hydrology. To explain the accelerated retreat of Peruvian glaciers, it is important to first know the principal atmospheric variables that interact with the surface of the glacier in order to evaluate the glacier-atmosphere energy balance. In this study, we analyze the atmospheric variables collected by an automatic weather station at an hourly resolution and we calculate the surface energy balance (SEB) with a newly updated COupled Snowpack and Ice surface energy and mass balance process-based model in PYthon (COSIPY) in its 2-dimesnional, spatially distributed version for the Artesonraju Glacier, located in the Peruvian Andes, from 2016 to 2018. In COSIPY, all components of the SEB are fiscally parameterized to except the incident shortwave solar radiation, which is measured directly. The average meteorological conditions are: air temperature 1.93 ± 0.83 °C, relative humidity 74 ± 18 %, wind speed 3.58 ± 2.47 m s⁻¹ and total cumulative precipitation 1740 mm. The glacier-wide energy input is dominated year-around by net shortwave radiation ($+ 80$ W m⁻²), followed by the ground heat flux ($+ 19$ W m⁻²) and turbulent sensible heat flux ($+ 7$ W m⁻²), while available energy at the glacier is consumed by net longwave radiation ($- 65$ W m⁻²) and the turbulent latent heat flux ($- 15$ W m⁻²).

Keywords: *Energy balance, atmospheric variables, Artesonraju Glacier*

Introducción

En la Cordillera Blanca (CB), localizada en el departamento de Ancash en el norte del Perú, se encuentra la mayor área de glaciares tropicales del mundo. En esta región, el agua proveniente del deshielo de los glaciares es crucial para el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura, la ganadería, el turismo y la generación de energía hidroeléctrica.

La tendencia de la temperatura media anual en la CB muestra un aumento de 0.13 °C/década al igual que la precipitación de 60 mm/década en los últimos 30 años, desde 1983 hasta 2012 (Schauwecker et al., 2014). Estacionalmente, el cambio en la precipitación muestra que durante la estación seca está disminuyendo (Schauwecker et al., 2014). Además de los cambios de la temperatura y precipitación, las partículas absorbentes de luz presentes en la capa de nieve están contribuyendo al acelerado retroceso de los glaciares en esta región (Schmitt et al., 2015; Torres et al., 2018).

La desaparición total de los glaciares en la CB cambiará el régimen hídrico hasta un 30% (Baraer et al., 2012; Juen, Kaser y Georges, 2007). Sin embargo, estas proyecciones pueden estar sujetas a incertidumbres, debido a que usaron modelos semiempíricos que, generalmente, no se adaptan bien bajo condiciones del cambio climático. Por lo tanto, existe una gran necesidad de desarrollar proyecciones realistas de la contribución de glaciares a la escorrentía en

la CB con la finalidad de informar a la planificación del uso de los recursos hídricos.

Para hacer proyecciones realistas de la contribución de los glaciares, un primer paso es comprender el balance de energía superficial (SEB), a través del uso de modelos basados en procesos físicos, los cuales se cree que se adaptan mejor bajo condiciones de cambio climático. Por lo tanto, en este estudio, analizamos las principales variables atmosféricas colectadas por dos estaciones meteorológicas (AWSs) y calculamos el SEB usando un modelo basado en procesos físicos COSIPY (COupled Snowpack and Ice surface energy and mass balance model PYthon) para el glaciar Artesonraju durante dos años (junio de 2016 hasta mayo de 2018).

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

El glaciar Artesonraju se localiza al norte de la Cordillera Blanca, Andes peruanos (lat.: 8°58' S y 8°56' S; long.: 77°38' W y 77°36' W; Figura 1). Este glaciar es de tipo circo, orientado de este a oeste. Tiene una superficie de 5.2 km² y oscila entre 4745 y 5729 m s.n.m. La cuenca del glaciar está dividida por tres picos importantes: el pico Artesonraju (5925 m s.n.m.) localizado al norte, el pico Parón (5600 m s.n.m.) localizado al este y el pico Pirámide (5805 m s.n.m.). Estos picos tienen importantes efectos locales en las variables atmosféricas.

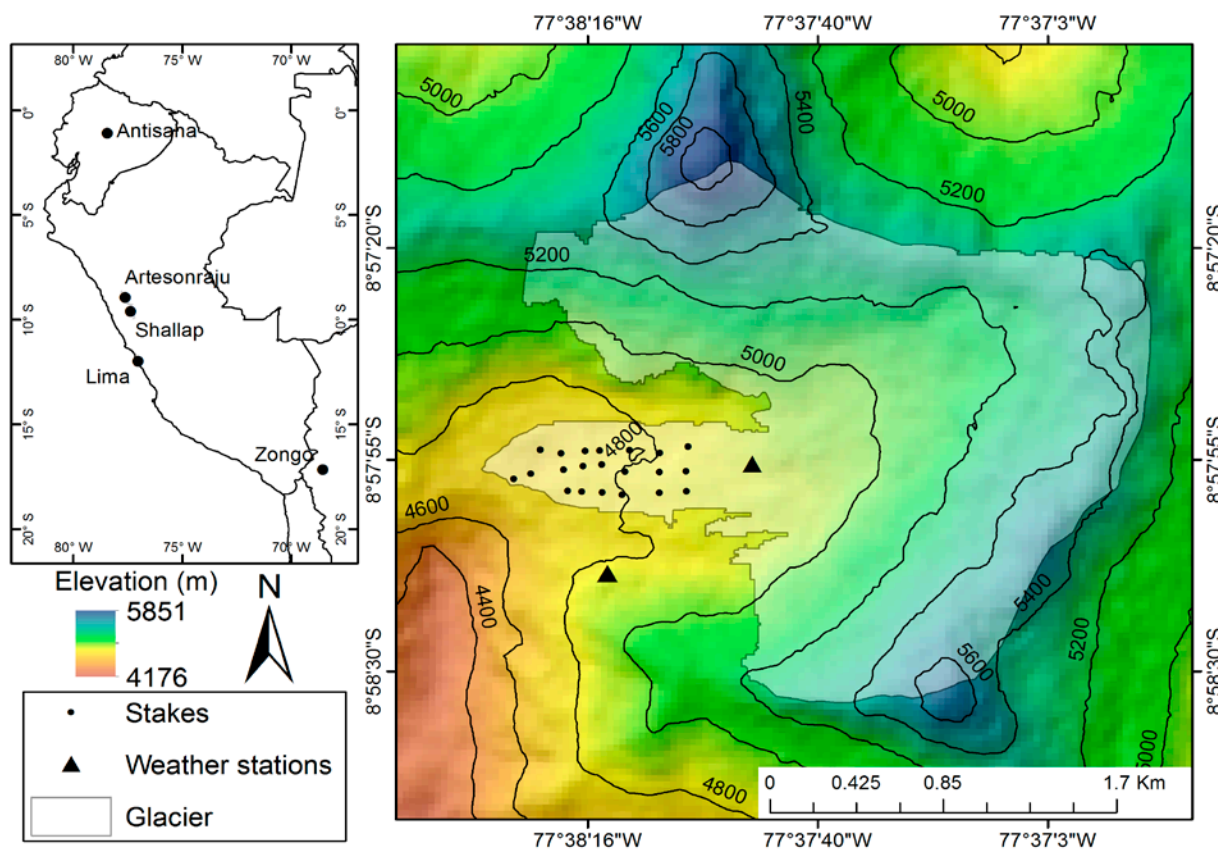


Figura 1. Localización del glaciar Artesonraju, estaciones meteorológicas automáticas AWSs (triángulos) y red de balizas ("stakes") de ablación, con cotas a 200 m de intervalo. Fuente: Elaboración propia.

Estaciones Meteorológicas

Dos estaciones meteorológicas automáticas (AWSs) de fabricación Campbell Scientific están colectando información de las variables atmosféricas en el glaciar Artesonraju desde el año 2005. Las AWSs son administradas por el Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Una estación está instalada sobre la superficie del glaciar en la zona de ablación a 4910 m s.n.m. (en adelante AWSG; Figura 2) y la otra en la morrena sur del glaciar a 4850 m s.n.m. (en adelante AWSM) (Figura 1). Ambas estaciones colectan datos cada 30 minutos de la temperatura del aire (Vaisala HMP45C), humedad relativa (Vaisala HMP45C) y velocidad del viento (Young propeller 05103). En la AWSG se miden los cuatro componentes de radiación (radiación de onda corta y larga incidente y reflejada) (Kipp y Zonen CRN4) y en la AWSM se mide, además de la radiación de onda corta incidente (Kipp y Zonen CMP3), la precipitación total (Campbell RM 52203) y la presión atmosférica (Vaisala CS106).

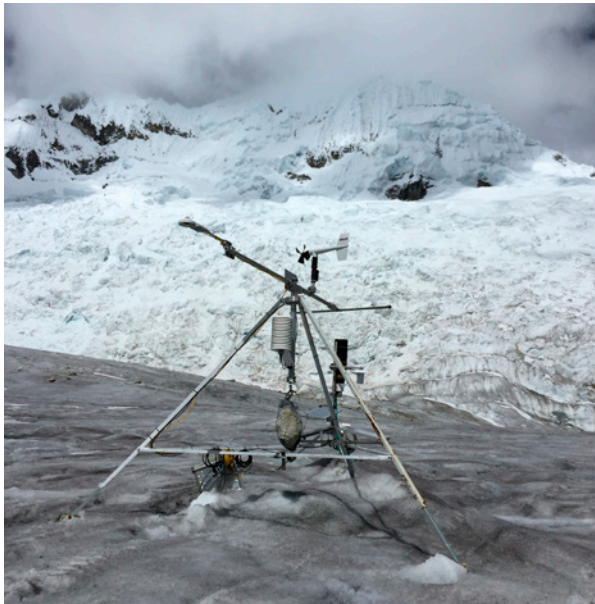


Figura 2. Foto de la estación meteorológica automática (AWSG) instalada en la zona de ablación en el glaciar Artesonraju (4910 m s.n.m.). Foto tomado por Fiorella Quiñones en 2019.

Preprocesamiento de los Datos Meteorológicos

El preprocesamiento de los datos consistió en: (1) revisión de la continuidad de las series temporales, (2) revisión de los valores dentro de los rangos de los sensores y (3) reconstrucción de las series temporales interrumpidas, aplicando regresión múltiple.

Las mediciones en la AWS_G se interrumpieron en dos periodos (Figura 3), por lo que se usan datos de la AWS_M para reconstruir las series de la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento en la AWS_G , usando funciones de regresión múltiple, similar enfoque a Gurgiser et al. (2013). Para la radiación de onda corta

incidente (SW_{in}) se aplicó un filtro con el ángulo cenital del sol para conservar los valores con ángulo cenital $<65^\circ$. Asimismo, se corrigieron los valores de SW_{in} en función de la topografía del terreno siguiendo el mismo método de Wohlfahrt et al. (2016). Los ángulos de la pendiente y orientación del terreno fueron tomados del modelo de elevación digital ASTER-GDEM con resolución espacial de 30 metros.

El Modelo COSIPY

COSIPY (COupled Snowpack and Ice surface energy and mass balance model PYthon) es un modelo basado en procesos físicos, que acopla el modelo del balance de energía superficial (SEB) y masa (MB) junto a la capa de nieve y hielo, para calcular los flujos de energía y masa disponibles en un glaciar (Huintjes et al., 2015). Dentro de COSIPY, el modelo de balance de energía superficial considera todos los flujos de energía que contribuyen a la disponibilidad de energía en la superficie del glaciar. El flujo de energía residual (F) se calcula según la Ecuación 1.

$$F = SW_{in}(1 - \alpha) + LW_{in} + LW_{out} + QS + QL + QG$$

(Ecuación 1)

donde SW_{in} es la radiación de onda corta incidente, α es el albedo de la superficie, LW_{in} y LW_{out} son la radiación de onda larga incidente y reflejada, QS y QL son los flujos turbulentos de calor sensible y latente, y QG es el flujo de calor contenido en la subsuperficie. Si F es positivo y la temperatura de la superficie es 273.15 K, la energía para el derretimiento QM es igual a F .

COSIPY es un modelo distribuido, por lo tanto, las variables atmosféricas para las simulaciones deben estar distribuidas. En este estudio, usamos campos meteorológicos con resolución espacial de 1000 m y los cálculos fueron a pasos de tiempo por hora. La SW_{in} se mide en un punto y se interpola considerando los efectos de la topografía como la pendiente y orientación, siguiendo el mismo enfoque a Wohlfahrt et al. (2016). El α se basa en el esquema de Oerlemans y Knap (1998), que calcula el albedo superficial como una función del albedo de la nieve reciente, el albedo firn, el albedo del hielo, el efecto de envejecimiento de la nieve en el albedo y el efecto del espesor de la capa de nieve en el albedo. LW_{in} se calcula como una función de la temperatura del aire, vapor del agua y cobertura de nubes, siguiendo la parametrización de Klok y Oerlemans (2002). LW_{out} se deriva desde la temperatura de la superficie modelada y la ley de Stefan-Boltzmann. Los flujos turbulentos de calor QS y QL son calculados usando el método aerodinámico en masa. QG se calcula a partir de la suma del flujo de calor conductivo y la fracción de la radiación que penetró la subsuperficie. El modelo resuelve la ecuación de energía termodinámica numéricamente en una capa vertical adaptativa.

Resultados y Discusión

Condiciones Meteorológicas Diarias

Las condiciones meteorológicas diarias de las estaciones meteorológicas automáticas (AWSs) se presentan en la Figura 3. Las líneas rojas presentan la serie en la AWS_M , las líneas negras presentan la serie en la AWS_G con la serie interrumpida y las líneas azules presentan la serie en la AWS_G con la serie reconstruida a partir de métodos estadísticos, según Gurgiser et al. (2013).

La temperatura del aire (T_{air}) en la AWS_G muestran un ciclo estacional poco marcado, con un promedio para todo el periodo de estudios de $1.93\text{ }^{\circ}\text{C}$. El rango de variación diaria fue de $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ con valor mínimo de -0.44

$^{\circ}\text{C}$ y máximo de $3.22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se observó una alta variabilidad diaria con una desviación estándar de $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El promedio de la humedad relativa (RH) en la AWS_G , para todo el periodo de estudios, fue de 74% con una desviación estándar de 18% . Se observó un ciclo estacional bien marcado, presentando valores más bajos entre mayo y agosto y valores más altos entre septiembre y abril.

El promedio de la velocidad del viento (w_s) en la AWS_G fue de 3.58 m s^{-1} , con una marcada variación estacional, presentando valores más altos entre junio y agosto y valores bajos entre octubre y abril. La precipitación acumulada (P_{total}) en la AWS_M durante los dos años fue de 1740 mm , y también presentó un ciclo estacional bien definido, con altas tasas de precipitación entre octubre y abril y poca o incluso nada entre mayo y septiembre.

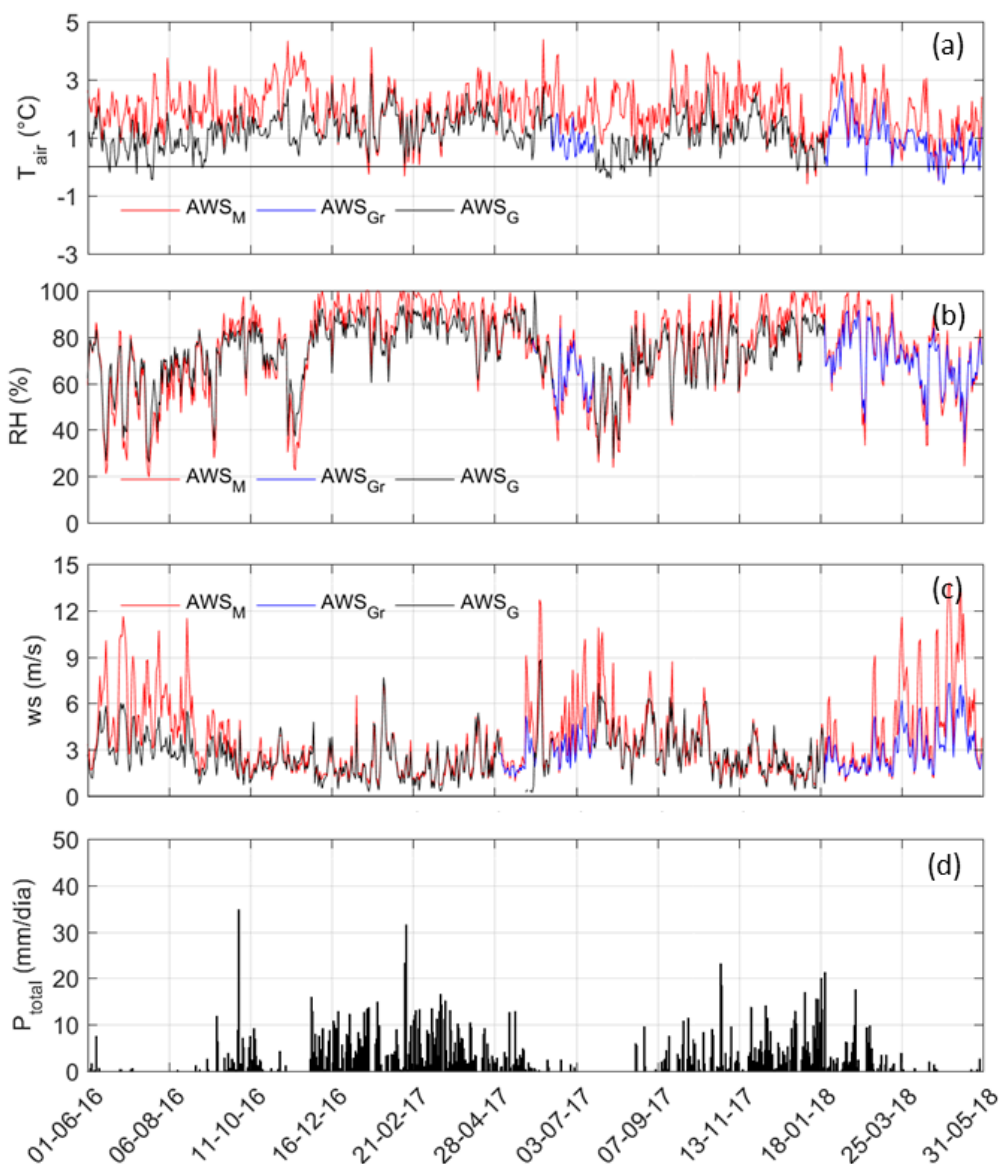


Figura 3. Promedio diario de la temperatura del aire (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c) y acumulado diario de la precipitación (d) desde junio de 2016 hasta mayo de 2018. La línea roja muestra las mediciones en la AWS_M , la línea azul muestra las series reconstruida en la AWS_G y la línea negra las series con interrupciones en la AWS_G . Fuente: Elaboración propia

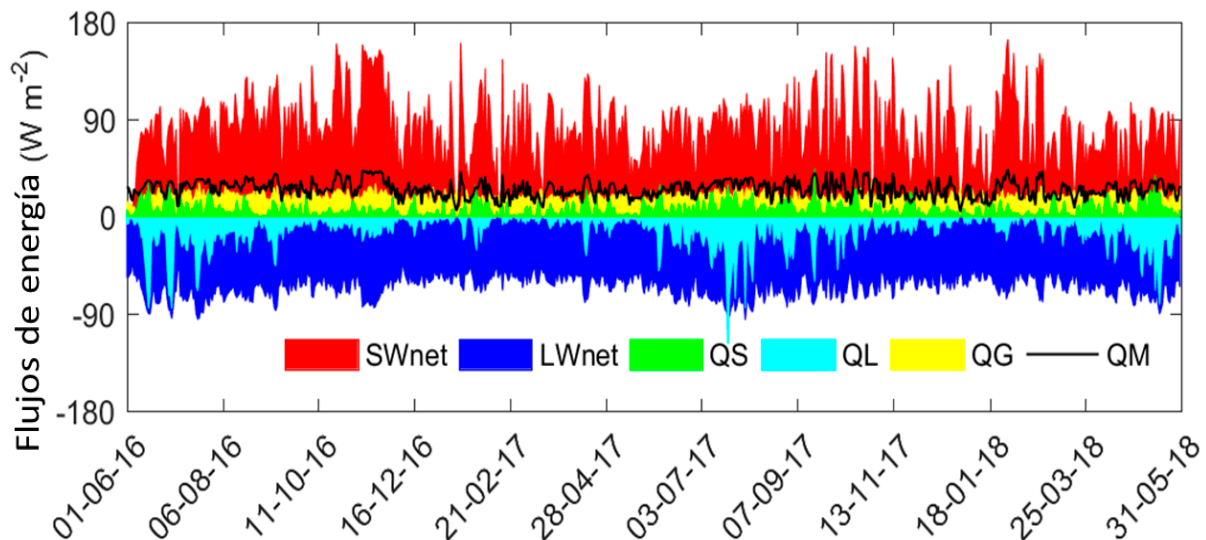


Figura 4. Componentes del balance de energía promedio diario de la radiación neta de onda corta (SWnet), radiación neta de onda larga (LWnet), los flujos turbulentos de calor sensible (QS) y latente (QL), y el flujo de calor contenido en la subsuperficie (QG) para todo el glaciar desde junio de 2016 hasta mayo de 2018. La línea negra presenta la energía disponible (QM) para derretir el glaciar. Fuente: Elaboración propia.

Flujos de Energía SEB

Los componentes del balance de energía superficial (SEB) se muestran en la Figura 4. Para una mejor representación de la figura, se calculó el promedio diario. Los resultados del SEB indican que la radiación neta de onda corta (SWnet) fue altamente variable, desde valores medios altos de 160 W m^{-2} en verano y valores bajos de 70 W m^{-2} en otoño. Además de los cambios estacionales de la elevación solar, la principal razón de la alta variabilidad estacional del SWnet es el albedo de la superficie.

El valor promedio de la radiación neta de onda larga (LWnet) en verano fue -70 W m^{-2} , menor que el valor promedio de -60 W m^{-2} de invierno. Esta diferencia está relacionada con la variación de la radiación de onda larga proveniente de la atmósfera (LWin) y de la superficie del glaciar (LWout), que son componentes de la LWnet. La LWin, que depende de la temperatura del aire, de la cobertura de nubes y de la humedad, fue alta en verano y baja en invierno (Zhang et al., 2013). En el glaciar Artesonraju, la humedad presenta una mayor influencia en la LWin.

Las condiciones generalmente más secas influyen para que el flujo turbulento del calor latente (QL) siempre sea negativo con valores altos en invierno, cuando la velocidad del viento es mayor y la humedad relativa es menor, lo que indica que el glaciar pierde masa por sublimación, principalmente en las estaciones de invierno. Para el flujo turbulento de calor sensible (QS) se observó que durante todo el periodo fue positivo.

La principal fuente de energía para el glaciar fue la SWnet con un valor de 80 W m^{-2} , seguida del flujo de calor contenido en la superficie (QG) con un valor de 19 W m^{-2} y del flujo turbulento QS con un valor de 7 W m^{-2} . Mientras

que el glaciar pierde energía a través de la LWnet con un valor -65 W m^{-2} y el flujo turbulento de QS 15 W m^{-2} . La disponibilidad de energía para derretir el glaciar fue de 25 W m^{-2} durante todo el periodo de estudios. Los resultados de nuestro estudio son comparables a estudios previos (p. ej., Gurgiser et al., 2013).

Conclusiones

La temperatura del aire fue de $1.93 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y muestra una baja variación estacional. La humedad relativa fue de 74% y muestra una marcada variación estacional, al igual que la velocidad del viento (3.58 m s^{-1}) y la precipitación (acumulado de 1740 mm). La energía disponible para derretir el glaciar fue de 25 W m^{-2} . La principal fuente de energía en el glaciar Artesonraju es la radiación neta de onda corta (SWnet), seguida del flujo de calor en la subsuperficie (QG) y del flujo turbulento de calor sensible (QS). El glaciar pierde energía a través de la radiación neta de onda larga (SWnet) y del flujo de calor latente (QL).

Agradecimientos

Se agradece a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por la beca de estudios concedida al primer autor a través del programa de becas PAEC OEA-GCUB. Asimismo, al Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la ANA por compartir los datos de las estaciones meteorológicas del glaciar Artesonraju.

Referencias

Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C., Gómez, J. y Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JG11J186>

Gurgiser, W., Marzeion, B., Nicholson, L., Ortner, M. y Kaser, G. (2013). Modeling energy and mass balance of Shallap Glacier, Peru. *The Cryosphere*, 7(6), 1787–1802. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1787-2013>

Gurgiser, W., Mölg, T., Nicholson, L. y Kaser, G. (2013). Mass-balance model parameter transferability on a tropical glacier. *Journal of Glaciology*, 59(217), 845–858. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J226>

Huintjes, E., Sauter, T., Schröter, B., Maussion, F., Yang, W., Kropáček, J., Buchroithner, M., Scherer, D., Kang, S. y Schneider, C. (2015). Evaluation of a Coupled Snow and Energy Balance Model for Zhadang glacier, Tibetan Plateau, Using Glaciological Measurements and Time-Lapse Photography. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(3), 573–590. <https://doi.org/10.1657/AAAR0014-073>

Juen, I., Kaser, G. y Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1–4), 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.038>

Oerlemans, J., y Knap, W. H. (1998). A 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 44(147), 231–238. <https://doi.org/10.3189/S0022143000002574>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, G., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N. y Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>

Schmitt, C. G., All, J. D., Schwarz, J. P., Arnott, W. P., Cole, R. J., Lapham, E. y Celestian, A. (2015). Measurements of light-absorbing particles on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 9(1), 331–340. <https://doi.org/10.5194/tc-9-331-2015>

Torres, C., Suárez, L., Schmitt, C., Estevan, R. y Helmig, D. (2018). Measurement of light absorbing particles in the snow of the Huaytapallana glacier in the central Andes of Peru and their effect on albedo and radiative forcing. *Optica Pura y Aplicada*, 51(4), 1–14. <https://doi.org/10.7149/OPA.51.4.51004>

Wohlfahrt, G., Hammerle, A., Niedrist, G., Scholz, K., Tomelleri, E., & Zhao, P. (2016). On the energy balance closure and net radiation in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 226–227, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.012>

Zhang, G., Kang, S., Fujita, K., Huintjes, E., Xu, J., Yamazaki, T., Haginoya, S., Wei, Y., Scherer, D., Schneider, C. y Yao, T. (2013). Energy and mass balance of Zhadang glacier surface, central Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology*, 59(213), 137–148. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J152>

Evaluación de Aerosoles Depositados en la Zona de Acumulación del Glaciar Artesonraju: 2014-2016

Evaluation of the aerosols deposited in the accumulation zone of the Artesonraju Glacier: 2014-2016

Rolando Cruz¹, Rafael Figueroa², Wolfgang Gurgiser³, Fiorella Quiñonez², Marlene Kronenberg⁴, Alejo Cochachín¹

¹ Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua, Huaraz

² Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz

³ Center for Climate and Cryosphere, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

⁴ Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

Resumen

Los aerosoles son emitidos a la atmósfera por fuentes naturales y antropogénicas y, a su vez, son transportados por el viento, llegando a lugares remotos como los glaciares. Este estudio se realizó en el glaciar Artesonraju a fin de evaluar los aerosoles depositados en su zona de acumulación para los años hidrológicos (AH) 2014 al 2016, y de analizar el albedo. Se realizaron seis perforaciones para extraer núcleos de neviza a diferentes profundidades, hasta ubicar la capa basal. Las concentraciones de aerosoles obtenidas se relacionaron con la pendiente, la orientación y la altitud a fin de obtener modelos y calcular la deposición para la zona de acumulación. La concentración de aerosoles depositados para el AH 2014-2015 fue de 4.017 toneladas en un área de 3677 km² y para el AH 2015-2016 fue de 5495 toneladas para un área de 3069 km². Se determinó que el viento catabático es el principal medio de transporte de los aerosoles con una predominancia general de este a oeste, y que la variación del albedo de la superficie del glaciar Artesonraju fue de 0.11 a 0.88 (media 0.37), con una tendencia decreciente, lo que da una señal del oscurecimiento progresivo del glaciar, por lo cual se incrementa su capacidad de absorber la energía solar incidente y, por tanto, se acelera su derretimiento.

Palabras clave: *Aerosoles, neviza, capa basal, albedo, glaciar Artesonraju*

Abstract

Aerosols are emitted into the atmosphere by natural and anthropogenic sources and are transported by the wind to remote places such as glaciers. This study was carried out on Artesonraju glacier to evaluate the aerosols deposited on its accumulation zone for the hydrological years (HY) 2014 to 2016 and to analyze the albedo. Six drillings were made to extract firn cores at different depths, until the basal layer was located. Aerosol concentrations obtained were related to slope, orientation and altitude to obtain models and calculate deposition for the accumulation zone. The concentration of deposited aerosols for the HY 2014-2015 was 4,017 metric tons for an area of 3,677 km² and for the HY 2015-2016 was 5,495 metric tons for an area of 3,069 km², determining that the katabatic wind is the main means of transport of the aerosols with a general predominance from east to west. The variation of the albedo of the surface of the Artesonraju glacier was from 0.11 to 0.88 (average 0.37), with a decreasing tendency, which gives us a sign of the progressive darkening of the glacier, increasing its capacity to absorb the incident solar energy and therefore accelerating its melting.

Keywords: *Aerosols, firn, basal layer, albedo, Artesonraju glacier*

Introducción

La criósfera describe colectivamente las porciones de la superficie de la Tierra donde el agua se encuentra en estado sólido: capa de nieve, glaciares, capas de hielo, hielo de agua dulce, hielo marino, icebergs y permafrost (Barry y Gan, 2011). En las últimas dos décadas, los glaciares siguen derretiéndose en el mundo, disminuyendo en extensión por efectos del cambio climático y las influencias antropogénicas, que contribuyen al retroceso de los glaciares desde la década de 1960 (IPCC, 2014).

Las actividades antropogénicas han causado cambios considerables en la composición de aerosoles y han incrementado las emisiones a la atmósfera que tienen una estrecha vinculación con el crecimiento económico, la densidad de población y el desarrollo tecnológico (Steyn y Chaumerliac, 2016). Los aerosoles constituyen partículas suspendidas en estado sólido o líquido cuyo tamaño puede variar entre 0.002 a más de 100 μm (Hinds, 1999), y que son transportados por el viento, llegando a depositarse en los glaciares de diferentes partes del mundo (Ming et al., 2007).

Los glaciares tropicales son indicadores muy sensibles del clima global (Kaser y Osmaston, 2002) y su retroceso es más pronunciado en pequeños glaciares

a bajas altitudes que no tienen una zona de acumulación permanente, y que podrían desaparecer en los próximos años o décadas (Rabatel et al., 2013). Además del incremento de la temperatura, la acumulación de aerosoles sobre los glaciares también afecta a su derretimiento. En este estudio se evalúa la concentración de aerosoles depositados en la zona de acumulación del glaciar Artesonraju para los años hidrológicos 2014 al 2016 y se analiza la variación del albedo de la superficie glaciar.

Metodología

Área de Estudio

La presente evaluación se llevó a cabo en el glaciar Artesonraju, ubicado en la Cordillera Blanca, distrito de Caraz, provincia de Huaylas, región Ancash (Figura 1). Este glaciar se encuentra entre 4700 y 6025 m s.n.m. Se realizaron expediciones de andinismo con el fin de identificar los lugares más seguros y representativos en la zona de acumulación, donde se hicieron perforaciones para la extracción de muestras de neviza.

Los lugares de muestreo se establecieron en la zona de acumulación del glaciar Artesonraju, ubicando las zonas más representativas y seguras para el equipo de trabajo (Tabla 1).

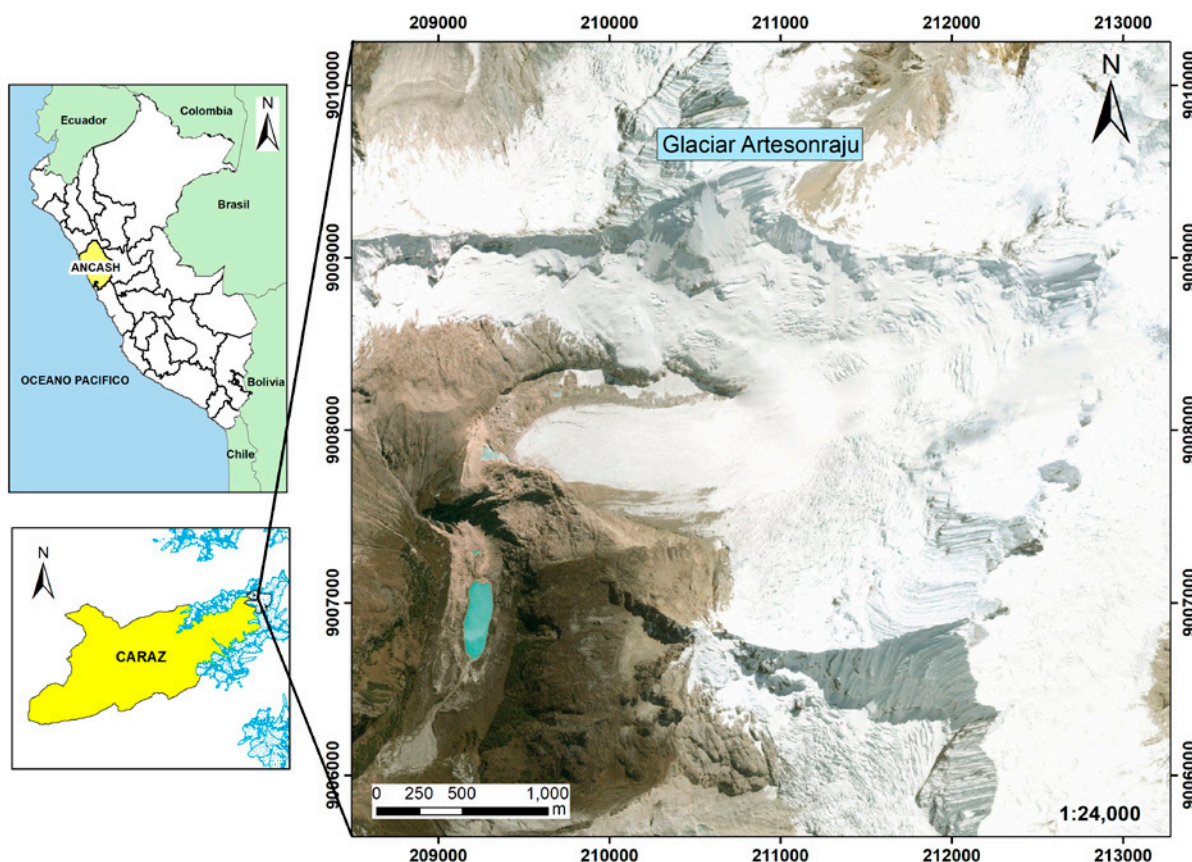


Figura 1. Ubicación del glaciar Artesonraju.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo.

Año hidrológico 2014-2015			
Punto de muestreo	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
AA-01	211648	9008348	5075
AA-02	211994	9008531	5194
AA-03	212200	9008591	5266
Año hidrológico 2015-2016			
AA-01	211632	9008348	5066
AA-02	212056	9008575	5201
AA-03	212167	9008571	5250

Perforación y Extracción de Núcleos de Neviza

Se realizaron seis perforaciones en total, tres correspondientes para el año hidrológico 2014-2015 y tres para el 2015-2016. Los núcleos de neviza fueron extraídos con una perforadora Kovacs, cuyas dimensiones fueron de 7.8 cm de diámetro y 1 m de largo. Esta perforadora se acopla a piezas de 1 m para realizar extracciones a mayores profundidades hasta ubicar la capa basal, obteniendo muestras que diferencian los periodos de años hidrológicos (Francou y Pouyaud, 2004).

Para ubicar la capa basal en cada punto de muestreo, se realizó un análisis de la densidad. Esto se obtuvo mediante la medición de las longitudes y la masa de cada núcleo de neviza extraída (Kaser et al., 2003).



Figura 2. Capa de nieve acumulada durante un año hidrológico (izquierda) y perforación para extracción de muestras de neviza (derecha). Fotos: Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas (RCE).

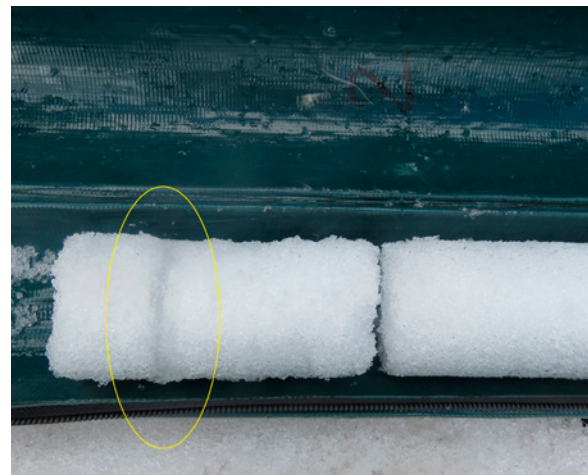


Figura 3. Medición de la densidad de neviza (izquierda) y ubicación de la capa basal (derecha). Fotos: Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas (RCE).

Análisis de Aerosoles y Albedo

Para el análisis de aerosoles depositados, se colectaron los núcleos de neviza de cada punto de muestreo en un envase de 20 litros de capacidad, previamente esterilizado. Las muestras colectadas se derritieron y luego se extrajo una submuestra de 1 litro para su análisis en laboratorio. El procedimiento en laboratorio es exponer la muestra de agua a una temperatura de 105 °C como indica Clesceri, Greenbery y Easton (1998), con lo cual se evapora el agua, dejando los aerosoles. Para el análisis de albedo y flujo de viento, se utilizaron datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de ablación del glaciar Artesonraju.

Concentraciones de Aerosoles en la Zona de Acumulación del Glaciar Artesonraju.

Para el cálculo de las concentraciones de aerosoles, se utilizó un Modelo Digital de Elevación - DEM Alos Palsar de 30 m para obtener la pendiente, orientación y altitud. Estas variables se analizaron mediante un análisis de regresión lineal simple con la concentración

de aerosoles en cada punto de muestreo para identificar las variables más representativas. El modelo para calcular la concentración en toda la zona de acumulación del glaciar Artesonraju fue determinado mediante un análisis de regresión lineal múltiple. Además, la zona de acumulación es considerada a partir de la línea de equilibrio (ELA) hacia zonas con mayor altitud.

Resultados

Análisis de la Densidad de Núcleos de Neviza

En todos los puntos de muestreo de la zona de acumulación del glaciar Artesonraju, la densidad (ρ) de los núcleos de neviza varía desde la superficie a mayor profundidad, como es el caso del año hidrológico 2014-2015 (Figura 4). En el punto AA-01, la capa basal se ubica a 245.5 cm de profundidad y su densidad varía de (0.28 a 0.66) g/cm³, media 0.54 g/cm³. En el punto AA-02, la capa basal se ubica a 292.5 cm de profundidad y su densidad varía de (0.42 a 0.62) g/cm³, media 0.53 g/cm³. En el punto AA-03 la capa basal se ubica a 175 cm de profundidad y su densidad varía de (0.51 a 0.81) g/cm³, media 0.63 g/cm³.

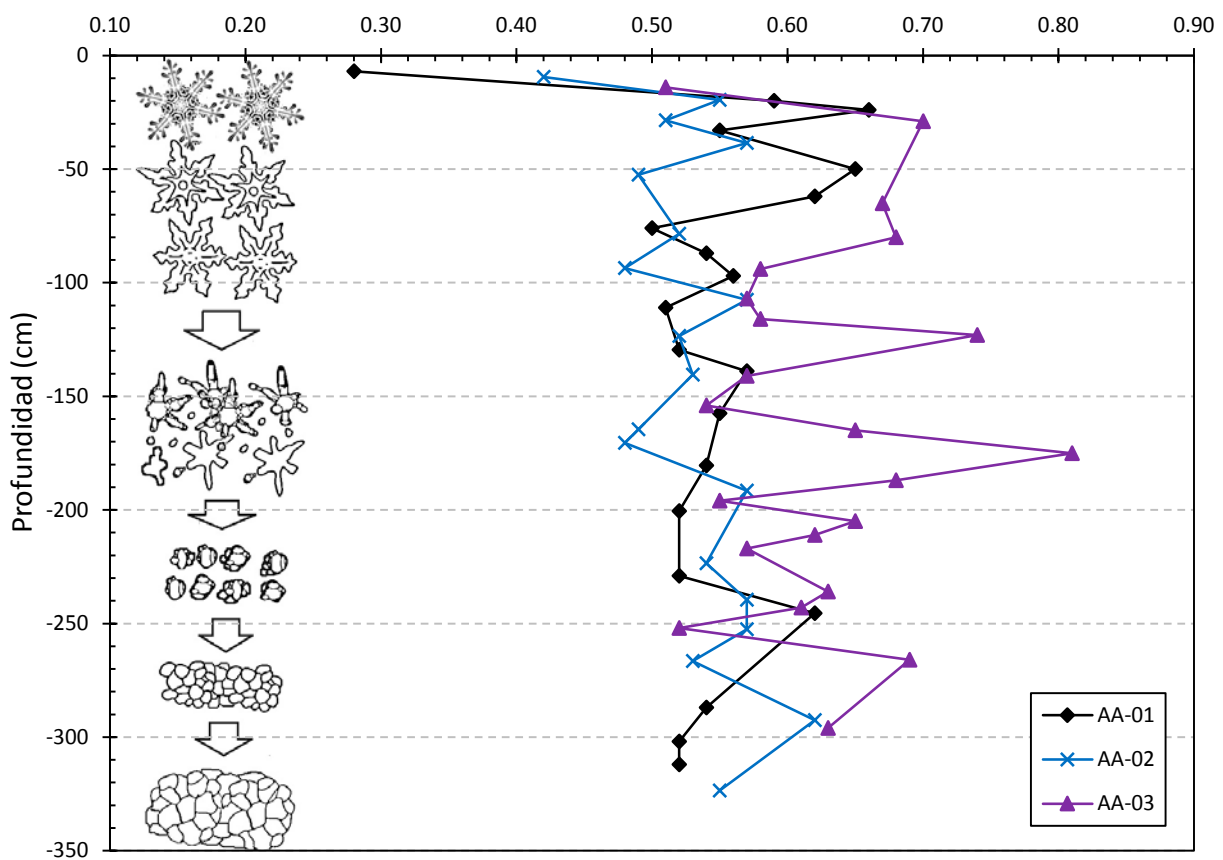


Figura 4. Variación de la densidad de neviza en el año hidrológico 2014-2015.

Fuente: Elaboración propia.

Para el año hidrológico 2015-2016 (Figura 5), en el punto AA-01, la capa basal se ubica a 77 cm de profundidad y su densidad varía de (0.50 a 0.70) g/cm³, media 0.59 g/cm³. En el punto AA-02 la capa basal se ubica a 266 cm de profundidad y su densidad varía de (0.51 a 0.68) g/cm³, media 0.58 g/cm³. En el punto AA-03 la capa basal se ubica a 285 cm de profundidad y su densidad varía de (0.19 a 0.61) g/cm³, media 0.52 g/cm³.

Concentraciones de Aerosoles

La concentración de aerosoles se calculó para el volumen total de cada punto de muestreo en función del volumen total de los núcleos de neviza fusionados, área de perforación y dimensiones del DEM (Tabla 2). La concentración de aerosoles indica la cantidad que se acumuló durante cada año hidrológico en una columna de neviza por unidad de área.

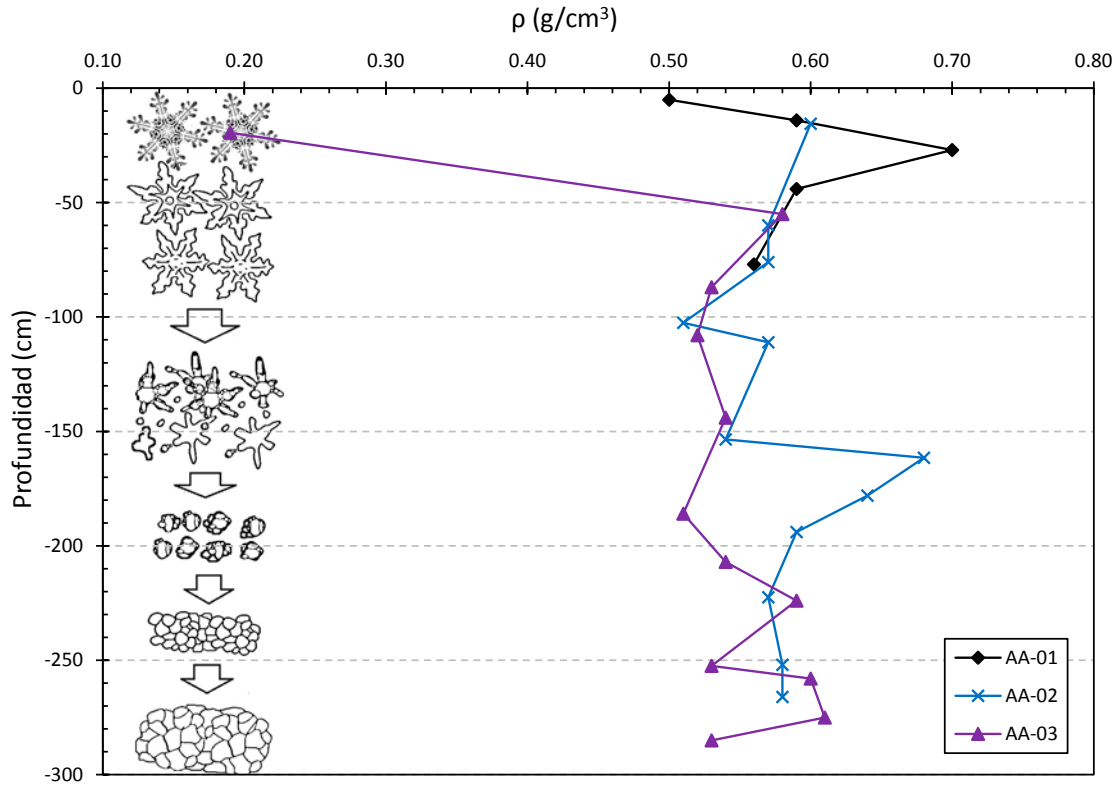


Figura 5. Variación de la densidad de neviza en el año hidrológico 2015-2016. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Concentraciones de aerosoles correspondientes a los puntos de muestreo.

Código	Análisis de laboratorio (mg/l)	V.T.N.F. (l)	Ae. (mg)	Ae (g) para la columna de muestra	g/m ² (*)	g/30m ² (**)
Año hidrológico 2014-2015						
AA-01	11.3	6.96	78.65	0.08	16.46	493.78
AA-02	9.67	7.06	68.27	0.07	14.29	428.62
AA-03	23.5	7.54	177.19	0.18	37.08	1112.5
Año hidrológico 2015-2016						
AP-01	3	7.65	22.95	0.02	4.8	144.09
AP-02	37	7.26	268.62	0.27	56.22	1686.5
AP-03	14	1.29	18.06	0.02	3.78	113.39

V.T.N.F. = Volumen total para los núcleos fusionados, Ae.= Aerosoles, (*) se usó el área de 0.0047783 m² correspondiente a la perforadora Kovacs, (**) 30 m² es el tamaño de pixel del DEM.

Tabla 3. Datos para el análisis de regresión lineal simple y múltiple.

Código	g/30m ²	A-DEM (m s.n.m.)	Pendiente (°)	Orientación (°)
Año hidrológico 2014-2015				
AA-01	493.78	5114	10.16	18.43
AA-02	428.62	5153	29.41	237.91
AA-03	1112.45	5249	11.99	210.96
Año hidrológico 2015-2016				
AA-01	113.39	5113	13.65	270
AA-02	1686.48	5207	35.3	257.79
AA-03	144.09	5239	11.38	210.17

A-DEM = Altitud obtenida del Modelo Digital de Elevación, (°) = grados.

Las variables que se utilizaron para un análisis de regresión lineal simple y múltiple se muestran en la Tabla 3.

Generación de Modelos para el Cálculo de la Concentración de Aerosoles

De acuerdo a Spiegel y Stephens (2018), se sugiere realizar un análisis de regresión lineal múltiple para generar modelos matemáticos y calcular la concentración de aerosoles para los años hidrológicos 2014-2015 y 2015-2016 (Tabla 4), utilizando las variables de concentración de aerosoles, A-DEM y pendiente.

Tabla 4. Modelos para calcular las concentraciones de aerosoles en la zona de acumulación del glaciar Artesonraju.

Año hidrológico	Ecuación
2014-2015	$Y = - 23714.574 + 4.759*A-DEM - 13.027*Pendiente$
2015-2016	$Y = - 8148.146 + 1.438*A-DEM + 66.411*Pendiente$

Distribución de las Concentraciones de Aerosoles en la Zona de Acumulación del Glaciar Artesonraju

La concentración de aerosoles depositados en el año hidrológico 2014-2015 (Figura 6) se calculó a partir de la Línea de Equilibrio (ELA = 5022 m s.n.m.). El área de la zona de acumulación es de 3677 km² y se depositaron 4017 toneladas de aerosoles. Su concentración varía de (0.0001 a 3.70) g/m², media 1.19 g/cm².

La concentración de aerosoles depositados en el año hidrológico 2015-2016 (Figura 7) se calculó a partir de la Línea de Equilibrio (ELA = 5038 m s.n.m.). El área de la zona de acumulación es de 3069 km² y se depositaron 5495 toneladas de aerosoles. Su concentración varía de (0.001 a 5.09) g/m², media 1.92 g/cm².

Análisis de Viento

En la Figura 8, se muestran los flujos de los sistemas de circulación de viento en el glaciar Artesonraju. El viento catabático es representado por las líneas azules. Son masas de aire frío con contenido de humedad (precipitaciones) y poseen >80% de predominancia, por lo cual es posible indicar que transportan la mayor cantidad de aerosoles que se depositan sobre el glaciar. Los vientos anabáticos, representados por las líneas rojas, son más suaves y poseen <20% de predominancia, lo cual permite indicar que transportan menor cantidad de aerosoles que se depositan sobre el glaciar.

Albedo

El albedo de la superficie del glaciar Artesonraju (Figura 9) muestra una variación de 0.11 a 0.88, (media 0.37). Además, se muestran valores máximos principalmente cuando hay presencia de nieve fresca (albedo > 0.7). Cuando la nieve se derrite o sublima, se exponen el hielo y los aerosoles depositados sobre su superficie (crioconitas), registrándose los valores mínimos (albedo ~0.1). La tendencia general de los valores del albedo es decreciente (línea roja), lo que da una señal del oscurecimiento progresivo del glaciar, con lo cual se incrementa su capacidad de absorber la energía solar incidente y, por tanto, se acelera el derretimiento.

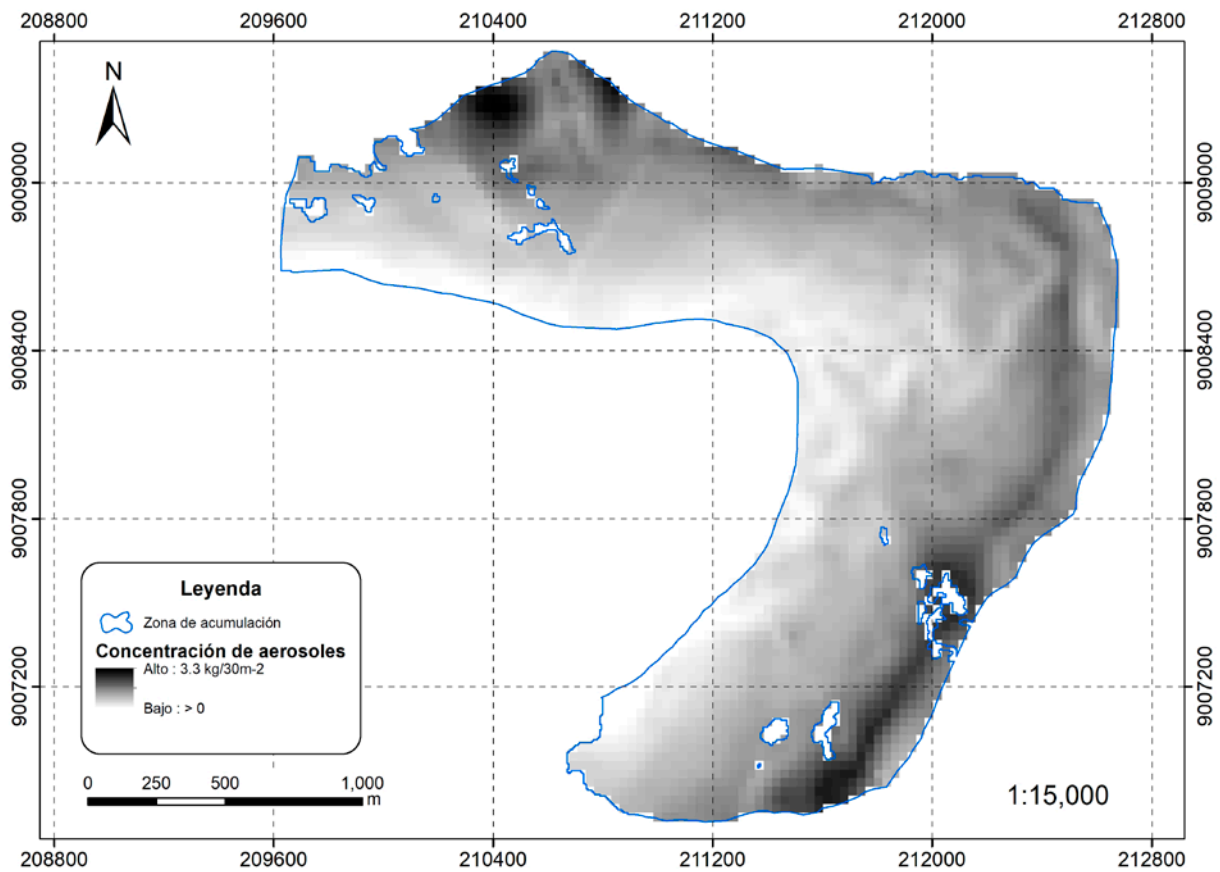


Figura 6. Aerosoles depositados en la zona de acumulación del glaciar Artesonraju, año hidrológico 2014-2015.
Fuente: Elaboración propia.

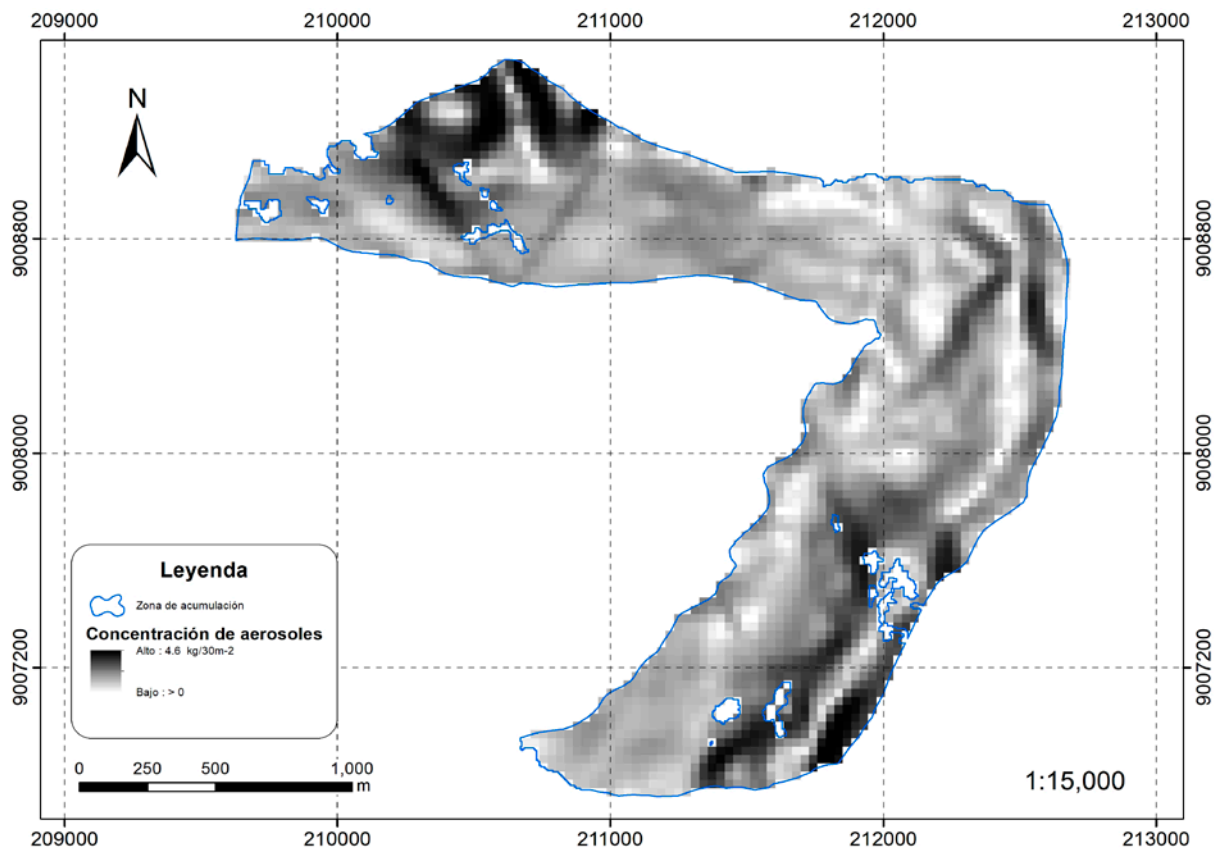


Figura 7. Aerosoles depositados en la zona de acumulación del glaciar Artesonraju, año hidrológico 2015-2016.
Fuente: Elaboración propia.

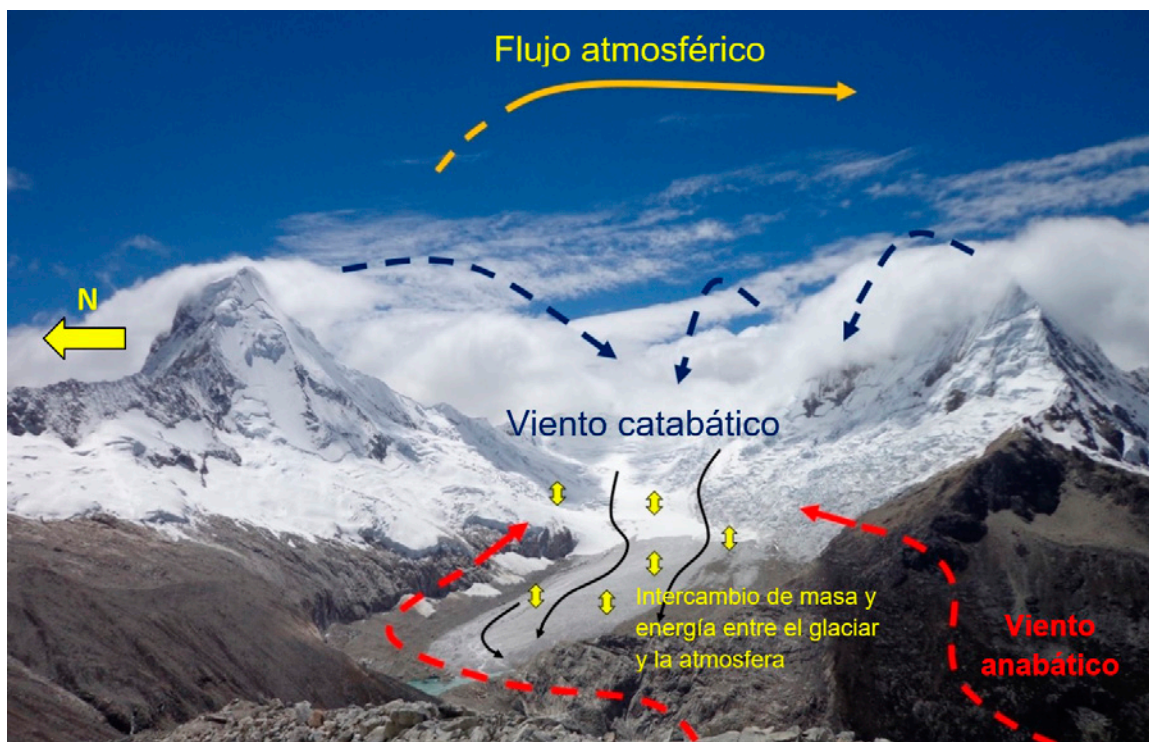


Figura 8. Sistemas de circulación de viento en el glaciar Artesonraju. Fuente: Elaboración propia.

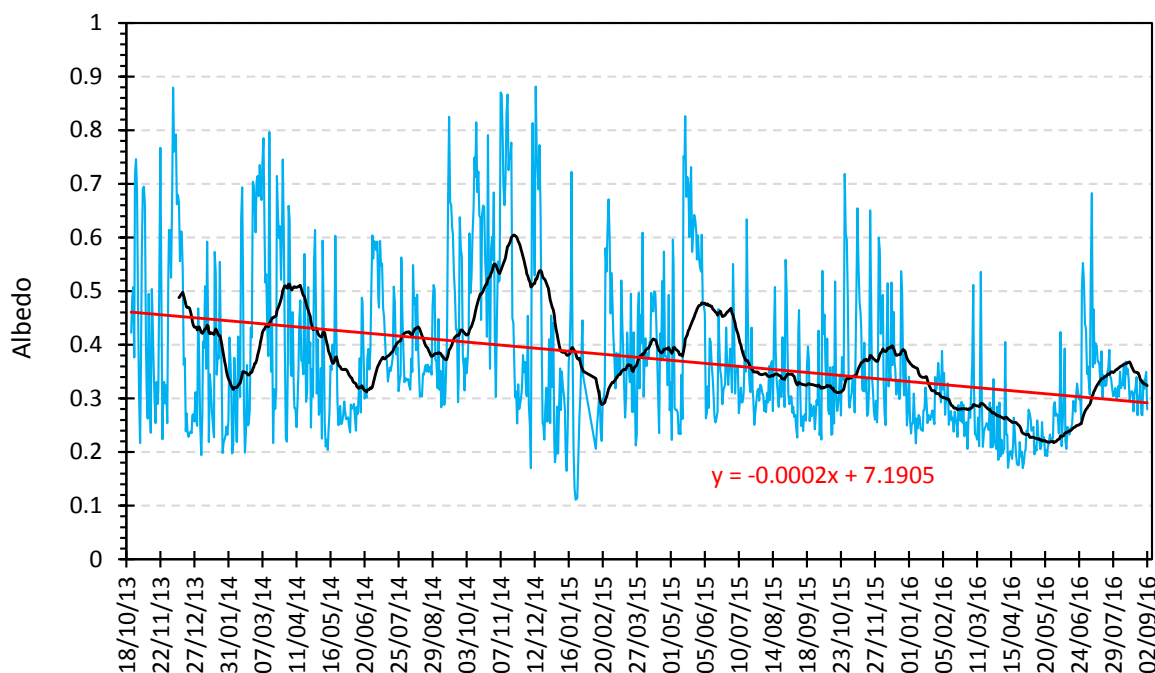


Figura 9. Variación del albedo en los años hidrológicos del 2014-2016. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Las concentraciones obtenidas en los dos años hidrológicos fueron de (0.0001 a 3.701) g/m², media 1.191 g/m², para 2014-2015, y de (0.001 a 5.099) g/m², media 1.916 g/m², para 2015-2016. El año hidrológico 2015-2016 tuvo mayor concentración que el anterior. Los resultados obtenidos en comparación con otros lugares son relativamente similares. Por ejemplo,

un estudio realizado en la superficie de los glaciares Qaanaaq Ice Cap y Tugto, en el noroeste de Groenlandia en la temporada de fusión de 2012, mostró (0.01 a 8.7) g/m², media 3.6 g/m², en la superficie de la nieve del glaciar (Takeuchi et al., 2014). En el caso de la capa de hielo de Groenlandia en Kronprinz Christians Land, se analizaron las partículas arrastrados por el viento local sobre la superficie, donde se registraron concentraciones de aproximadamente 16 g/m² en

superficies con baja carga de impurezas. Las superficies muy cargadas tuvieron concentraciones tan altas como 1.4 kg/m^2 (Bøggild et al., 2010).

El efecto de la deposición de aerosoles sobre nieve y hielo genera la reducción progresiva del albedo durante varios años, por lo tanto acelera la fusión (Box et al., 2012; Hansen y Nazarenko, 2004).

Conclusiones

La concentración de aerosoles depositados para el año hidrológico 2014-2015 fue de 4017 t para un área de 3677 km^2 . Su concentración varía de $(0.0001 \text{ a } 3.70) \text{ g/m}^2$, media 1.19 g/cm^2 , y para el año hidrológico 2015-2016 fue de 5495 t para un área de 3069 km^2 . Su concentración varía de $(0.001 \text{ a } 5.09) \text{ g/m}^2$, media 1.92 g/cm^2 .

La variación del albedo de la superficie del glaciar Artesonraju fue de 0.11 a 0.88, (media 0.37), con una tendencia decreciente, lo que da una señal del oscurecimiento progresivo del glaciar, el cual incrementa su capacidad de absorber la energía solar incidente y por tanto acelera su derretimiento.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo económico para los análisis de laboratorio al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Francia, y al Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) por el apoyo logístico. Además, a la Universidad de Innsbruck, Austria, por compartir datos meteorológicos.

Referencias

- Barry, R. y Gan, T. Y. (2011). *The global cryosphere: Past, present and future*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977947>
- Bøggild, C. E., Brandt, R. E., Brown, K. J. y Warren, S. G. (2010). The ablation zone in northeast greenland: Ice types, albedos and impurities. *Journal of Glaciology*, 56(195), 101–113. <https://doi.org/10.3189/002214310791190776>
- Box, J. E., Fettweis, X., Stroeve, J. C., Tedesco, M., Hall, D. K. y Steffen, K. (2012). Greenland ice sheet albedo feedback: Thermodynamics and atmospheric drivers. *The Cryosphere*, 6(4), 821–839. <https://doi.org/10.5194/tc-6-821-2012>
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. y Easton, A. D. (Eds.). (1998). *Standard methods for examination of water and wastewater (20.o ed.)*. Washington, D.C., American Public Health Association.
- Franco, B. y Pouyaud, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamientos de datos. Versión 1. Great Ice, IRD, Francia*. doi: 10.13140/RG.2.1.4220.8164
- Hansen, J. y Nazarenko, L. (2004). Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(2), 423–428. <https://doi.org/10.1073/pnas.2237157100>
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: Properties, behavior and measurement of airborne particles (2.a ed.)*. Somerset, John Wiley and Sons.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Summary for Policymakers. En Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1-30*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kaser, G., Fountain, A. y Jansson, P. (2003). *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers with particular attention to low latitude characteristics. IHP-VI Technical Documents in Hydrology, 59*. Paris, International Hydrological Program, UNESCO. <http://glaciers.pdx.edu/fountain/MyPapers/KaserEtAl2002.pdf>
- Kaser, G. y Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers. International Hydrology Series*. Cambridge University Press.
- Ming, J., Zhang, D., Kang, S. y Tian, W. (2007). Aerosol and fresh snow chemistry in the East Rongbuk Glacier on the northern slope of Mt. Qomolangma (Everest). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D15):D15307, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2007JD008618>
- Rabatel, A., Franco, 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., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Spiegel, M. R. y Stephens, L. J. (2018). *Schaum's outline of statistics (6.a ed.)*. McGraw Hill Education.
- Steyn, D. G. y Chaumerliac, N. (Eds.). (2016). *Air Pollution Modeling and Its Application XXIV*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24478-5>
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J. y Shimada, R. (2014). Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 85–94. <https://doi.org/10.5331/bgr.32.85>

Temperatura Media Invernal de la Superficie Terrestre como Indicador del Cambio Climático en la Cordillera Vilcanota

Average Winter Temperature of the Terrestrial Surface as an Indicator of Climate Change in the Cordillera Vilcanota

Hairo León Dextre^{1,2*}, Katy Medina Marcos¹ y Edwin Loarte Cadenas¹

¹ Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Huaraz

² Facultad de Ciencias del Ambiente, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), Huaraz

*hleond@unasam.edu.pe

Resumen

El cambio climático tiene un claro impacto sobre diversos ecosistemas, especialmente en los glaciares tropicales, debido a la estrecha relación que establecen con la temperatura. Para comprender la magnitud de este impacto, se ha desarrollado el presente estudio, el cual busca evaluar los procesos de calentamiento en la Cordillera Vilcanota, comprendida entre los 14°33'08" y 13°07'23" latitud sur y los 71°45'11" y 70°28'14" longitud oeste, empleando la temperatura de la superficie terrestre (LST) y el índice de heladas superficiales obtenidos de los productos LST de MODIS Terra, en el periodo 2002 a 2019 durante el invierno austral (junio-agosto).

Se realizó la relación entre la LST media mensual y la temperatura media mensual del aire, obteniéndose una correlación significativa que varía de 0.55 a 0.85 °C, lo cual demuestra que los datos de LST tienen un bajo grado de incertidumbre. La distribución de la tendencia LST media de invierno aumenta en la mayoría de las áreas, mientras que disminuye en solo unas pocas. Esta tendencia muestra que la LST media de invierno está aumentando a una tasa promedio de 0.19 °C en 18 años. La tendencia LST media durante el invierno tiene una clara dependencia de la elevación, con efectos de calentamiento más fuertes en elevaciones más altas: -0.15 °C a 1000-1500 m s.n.m., y 0.52 °C por encima de 5000 m s.n.m., mientras que el índice de heladas superficiales tiene valores fluctuantes de 0 a 1, concentrándose la mayoría de ellos en las partes altas (≥ 5000 m s.n.m.).

Palabras clave: *LST, heladas superficiales, sensoramiento remoto, MODIS, Cordillera Vilcanota*

Abstract

Climate change has a clear impact on various ecosystems, especially tropical glaciers, due to the close relationship they establish with temperature. To understand the magnitude of this impact, the present study has been developed, which seeks to evaluate the heating processes in the Cordillera Vilcanota, between 14°33'08" and 13°07'23" south latitude and 71° 45'11" and 70°28'14" west longitude, using the land surface temperature (LST) and the index of surface frosts obtained from the MODIS Terra LST products, in the period 2002 to 2019 during the austral winter (June-August).

The relationship between the monthly mean LST and the monthly mean air temperature was made, obtaining a significant correlation that varies from 0.55 to 0.85 °C, which shows that the LST data have a low degree of uncertainty. The winter mean LST trend distribution is increasing in most areas, while decreasing in only a few. This trend shows that the winter mean LST is increasing at a 17-year average rate of 0.19 °C. The winter mean LST trend has a clear elevation dependence, with stronger warming effects at higher elevations: -0.15°C at 1000-1500 m a.s.l., and 0.52 °C above 5000 m a.s.l., while the index of surface frosts fluctuates from 0 to 1, concentrating mostly in the highlands (≥ 5000 m a.s.l.).

Keywords: *LST, superficial frosts, remote sensing, MODIS, Cordillera Vilcanota*

Introducción

Es evidente que uno de los efectos del cambio climático es el incremento de la temperatura. Esto ha llevado a que muchos científicos investiguen acerca de estos temas (Giorgi et al., 1997; Vuille et al., 2015; Aguilar-Lome et al., 2019), pues estos cambios generan impactos en nuestros ecosistemas, especialmente en los glaciares, los cuales pierden volumen a medida que pasa el tiempo y se incrementa la temperatura (INAIGEM, 2018). Por tal motivo, se ha planteado realizar el presente estudio con la finalidad de medir este impacto y tener conocimiento de cómo la temperatura se está comportando en función del tiempo, así como evaluar el impacto que este está teniendo sobre la cobertura de la tierra.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

Los Andes peruanos se dividen en tres sectores: norte, centro y sur. La cordillera Vilcanota es parte de las cordilleras del sur del Perú. La mayor parte de su área se encuentra políticamente ubicada en el departamento de Cusco y se extiende entre los 14°33'08" y 13°07'23" latitud sur y los 71°45'11" y 70°28'14" longitud oeste (Figura 1). La cordillera Vilcanota tiene un área de 7521 km² con una extensión aproximada de 134 km (INAIGEM, 2018). El objetivo principal del presente estudio es estimar la magnitud del impacto que ejerce el cambio climático

en dicha cordillera, empleando la temperatura media invernal de la superficie durante el invierno austral (junio, julio y agosto) en el período 2002 al 2019.

Datos

Temperatura superficial terrestre (LST)

Se emplearon los productos MODIS LST (MOD11A2, versión 006) obtenidos del satélite Terra, los cuales fueron descargados de la base de datos EarthData que pertenece al United States Geological Survey (USGS).

Tabla 1. Características de la base de datos LST empleada en el estudio.

Característica	Descripción
Producto	MOD11A2
Tiempo de adquisición	Junio, julio y agosto
Período de adquisición	2002-2019
Tiles	h10v09, h10v10 y h11v10
Resolución temporal	8 días
Resolución espacial	1 km
Capas de interés	LST_Day_1km LST_Night_1km

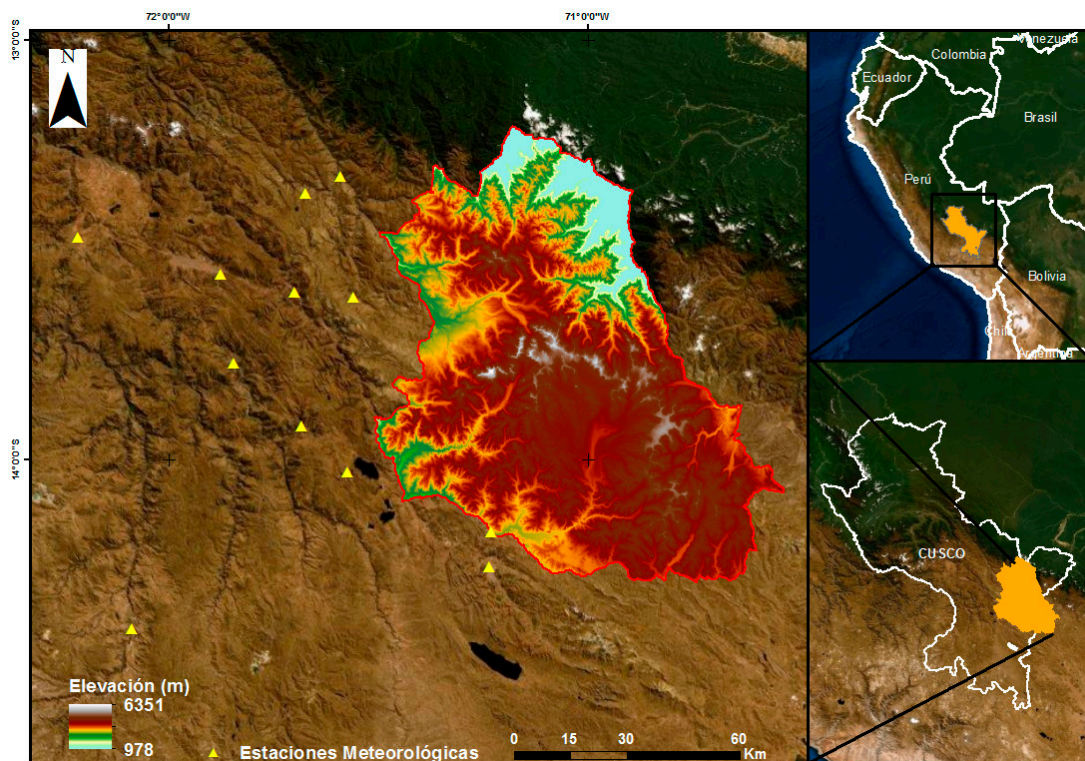


Figura 1. Ubicación del área de estudio empleando el modelo de elevación digital MERIT DEM. Las altitudes están indicadas por las diferencias de color, y los triángulos representan las estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia.

Estos productos contienen diversas capas de información como la LST durante el día y la noche, ángulo cenital, evaluación de la calidad, periodo de observación, entre otras (Wan, 2014; Wan, Zhang, Zhang y Li, 2002). El satélite TERRA/MODIS pasa por el área de estudio dos veces al día, la primera entre las 15:40-15:45 y luego completa toda el área a las 3:15-3:20, siguiendo una órbita solar sincrónica y cercana a los polos. Por ello, puede viajar fácilmente de sur a norte, obteniendo así en un mismo día la temperatura superficial del suelo tanto en el día como en la noche (Mao et al., 2017).

Datos de Temperatura del Aire

Los datos de temperatura del aire fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La temperatura media invernal es el cálculo del promedio entre la temperatura máxima y la temperatura mínima durante el invierno austral. Esta información fue colectada durante los años 2002 a 2019 en 12 estaciones meteorológicas distribuidas por encima de los 3000 m s.n.m. La Figura 1 muestra la localización de las estaciones meteorológicas. La Tabla 2 presenta los nombres de las estaciones meteorológicas, sus coordenadas geográficas y la elevación para cada estación.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas usadas para los datos de temperatura.

Nombre	Longitud	Latitud	Elevación (m)
Granja Kcayra	-71.875	-13.557	3219
Paruro	-71.845	-13.768	3084
Acomayo	-71.684	-13.917	3160
Paucar Tambo	-71.591	-13.324	3042
Ccatcca	-71.560	-13.610	3729
Santo Tomas	-72.089	-14.399	3253
Yauri	-71.417	-14.817	3927
Sicuani	-71.237	-14.254	3574
Cay Cay	-71.700	-13.600	3150
Pomacanchi	-71.573	-14.028	3200
Sallca	-71.232	-14.170	3956
Colquepata	-71.673	-13.363	3729

Modelo de Elevación Digital (DEM)

El MERIT DEM (Multi-Error Removed Improved Terrain Digital Elevation Model) fue desarrollado por Dai Yamazaki, eliminando múltiples componentes de error (sesgo absoluto, ruido moteado y sesgo de altura de árbol) de los DEM existentes (SRTM3 v2.1 y AW3D-30M V1). Representa las elevaciones del terreno a una resolución de tres segundos (~90 m en el ecuador) y cubre áreas de la Tierra entre 90N-60S, tomando como referencia al geoide EGM96 (Yamazaki et al., 2017).

Metodología

Para evaluar la calidad de los datos de LST, el promedio de la temperatura media invernal fue comparado con el valor de la temperatura media invernal del aire para cada una de las estaciones meteorológicas. Esto sigue la metodología descrita por François et al. (1999). La relación entre estos dos datos se evalúa mediante regresión lineal. El coeficiente de correlación de Pearson se utilizó como prueba de bondad de ajuste. Las tendencias de MODIS LST durante el invierno se calcularon utilizando el método de Sen (Sen, 1968) para cada píxel siguiendo la siguiente ecuación:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right), \forall j > k \tag{1}$$

donde x_j y x_k representan los valores de temperatura en los tiempos t_j y t_k respectivamente; $\beta < 0$ indica una tendencia negativa, mientras que $\beta > 0$ indica una tendencia positiva.

Este método requiere que los datos se distribuyan normalmente y no es sensible a valores atípicos. La prueba de Mann-Kendall se empleó para evaluar la significación estadística de las tendencias. Esta prueba se ha aplicado en diversos estudios sobre tendencias hidrometeorológicas y otras series temporales ambientales (Aguilar-Lome et al., 2019; Ran, Li, y Jin, 2012). Una vez determinados los valores de incremento o decremento de la LST, se contabilizó la cantidad de áreas > 5000 m s.n.m. por cada valor de incremento en la LST para obtener un gráfico de acumulación en porcentaje. Finalmente, para obtener el índice de heladas superficiales, se siguió el modelo usada por Ran et al. (2011):

$$F = \frac{DDF^{1/2}}{DDF^{1/2} + DDT^{1/2}} \tag{2}$$

donde DDF y DDT son índices de congelación y descongelación de la superficie, respectivamente, expresados en grados/días, y F indica el número de heladas en la superficie.

Estos índices son calculados empleando las siguientes ecuaciones:

$$DDT = T_S * L_S \tag{2.1}$$

$$DDF = -T_W * L_W \tag{2.2}$$

donde T_S y T_W son las temperaturas medias máximas y mínimas durante un periodo estudiado, y L_S y L_W son la duración de ese periodo. Se asume que todas las temperaturas se expresan en grados Celsius (Harris, 1981; Nelson y Outcalt, 1987).

Resultados

Relación Existente entre la MLST Media y la Temperatura Media del Aire (TMIA)

La relación entre la temperatura media invernal de la superficie terrestre (MLST) y la temperatura del aire tiene una correlación significativa, alcanzando su mayor grado de correlación con un valor máximo de 0.85 y un valor mínimo de 0.55, con un promedio del coeficiente de correlación de 0.69 (Figura 2). El resto de los valores se encuentra fluctuando en este rango, lo cual significa que los datos de LST son válidos para ser empleados en este estudio.

Pruebas de Tendencia LST

Aplicando la prueba de tendencia de Mann-Kendall, se determinaron los tres tipos de valores: los mayores a cero tienen una tendencia positiva, los menores a cero tienen una tendencia negativa, y los con valor de cero no presentan ningún tipo de tendencia. Resulta que la distribución de tendencia de la LST media de invierno aumenta en un 85% de las áreas, mientras que solo disminuye en 15% en unas pocas, como se muestra en la Figura 3.

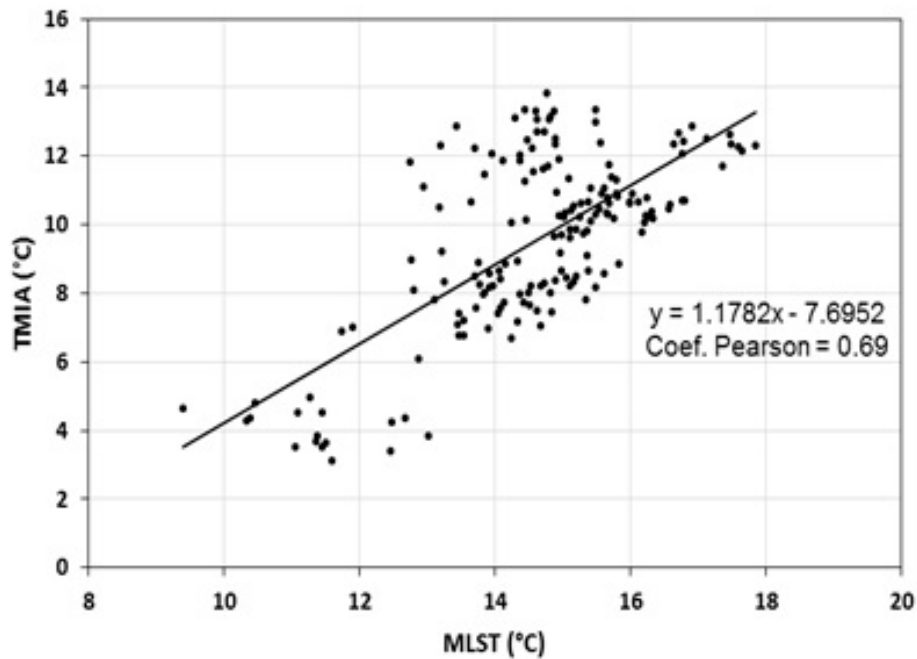


Figura 2. Diagrama de dispersión de MLST/TMIA observado para los datos utilizados. Fuente: Elaboración propia.

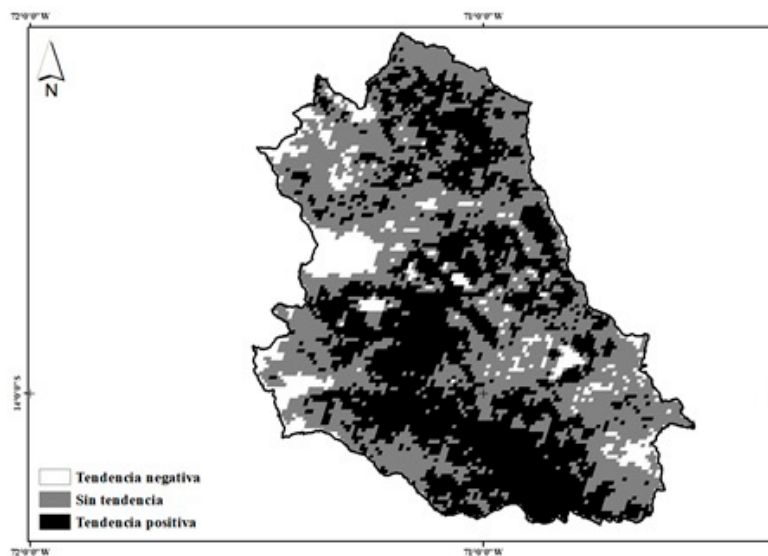


Figura 3. Tendencia de Mann-Kendall aplicada a los datos de MSLT de 2002 al 2019. Fuente: Elaboración propia.

Esta tendencia muestra que la LST media de invierno está aumentando a una tasa promedio de 0.002 °C al año (Figura 4). La tendencia de la LST media durante el invierno tiene una relación directa con la altitud, puesto que los efectos del calentamiento muestran un aumento de 0.52 °C por encima de los 5000 m s.n.m. en los 18 años de estudio, mientras que se tiene un decremento de -0.15 °C por debajo de los 2000 m s.n.m.

El índice de heladas superficiales tiene un valor cercano a 1 en las partes más altas, aproximadamente por encima de los 5000 m s.n.m., lo cual indica que son superficies más frías y propensas a contener elementos propios de ecosistemas criosféricos, por ejemplo, permafrost (Figura 5).

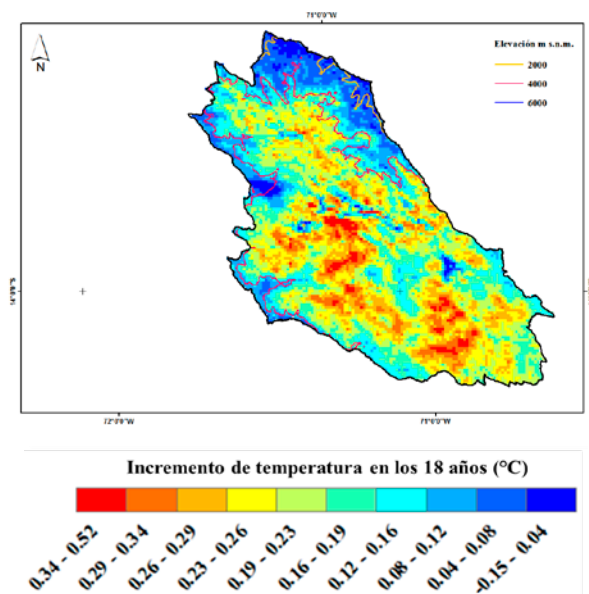


Figura 4. Incremento de la temperatura media invernal durante los últimos 18 años. Fuente: Elaboración propia.

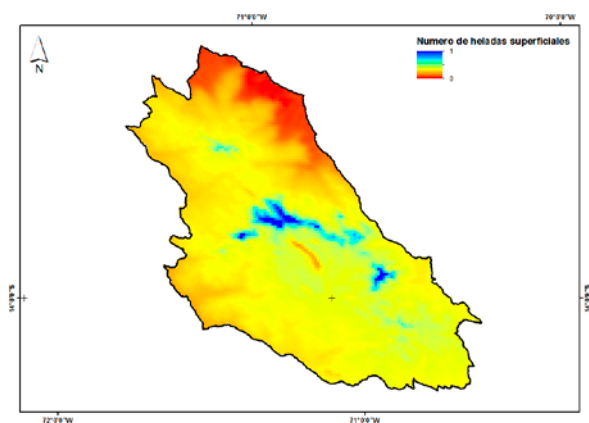


Figura 5. Índice de heladas superficiales entre 2002 y 2019. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Relación entre la MLST y Temperatura Media Invernal

La comparación realizada de mes a mes entre los datos de temperatura del aire y los datos LST indican correlaciones que varían de un período a otro. Estas correlaciones son significativas y se pueden admitir para realizar comparaciones. La diferencia existente entre ambos tipos de datos puede deberse a la instrumentación, puesto que la temperatura del aire se mide con un termómetro expuesto al aire a más de 1.5 m del suelo y protegido de la radiación solar (OMM, 2018). La LST está definida por la radiación emitida por la superficie de la tierra y captada por el sensor de un satélite con un ángulo de visualización (Wan et al., 2002). Sin embargo, se puede observar un comportamiento equivalente entre ambas temperaturas, similares a los obtenidos por Aguilar et al. (2019), donde los valores de los coeficientes de correlación varían entre $0.57 \leq R \leq 0.82$.

Pruebas de Tendencia a la LST

Las tendencias para la LST mostraron que la temperatura aumentó gradualmente durante los años 2002-2019. Estas mismas tendencias fueron reportados por Vuille et al. (2015), al igual que Aguilar et al. (2019). Por otro lado, se evidenció que el aumento de temperatura crecía con la altura. Por ello, al realizar un análisis de las áreas ≥ 5000 m, el incremento mayoritario fue de 0.02 °C/año (Figura 6).

Giorgi et al. (1997) encontraron que el calentamiento con la altitud está relacionado con la reducción en la nieve y la cobertura de los glaciares, lo que disminuye el albedo de la superficie y aumenta la absorción de la radiación solar por la superficie de la Tierra. Pepin et al. (2015) discutieron mecanismos importantes que contribuyen al calentamiento dependiente de la elevación como el albedo de nieve y los procesos físicos que ocurren en la superficie.

Conclusión

La clara dependencia de las tendencias de aumento de la temperatura de la superficie terrestre con respecto a la elevación podría tener graves consecuencias para los recursos hídricos almacenados en los glaciares de la Cordillera Vilcanota, mayormente en el departamento de Cusco. Sin embargo, es conveniente realizar mediciones in situ para tener un mejor panorama de la situación, así como para contrastar con los resultados de este estudio.

Referencias

Aguilar-Lome, J., Espinoza-Villar, R., Espinoza, J.-C., Rojas-Acuña, J., Willems, B. L. y Leyva-Molina, W.-M. (2019). Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–

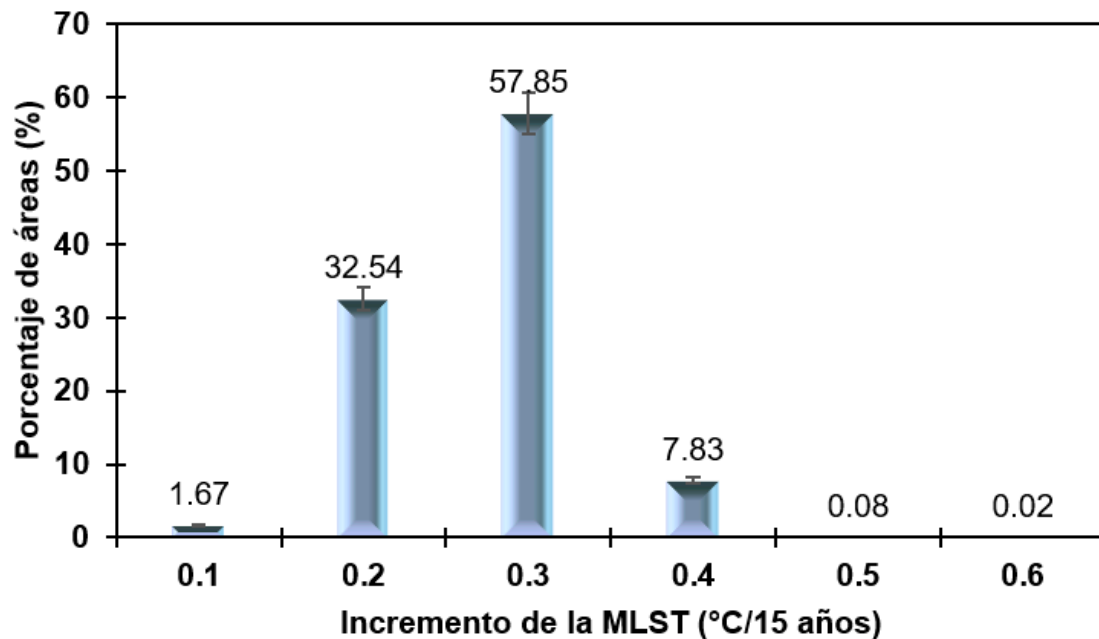


Figura 6. Incremento de la LST en áreas mayores a los 5000 m s.n.m. Fuente: Elaboración propia.

2017). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.013>

François, C., Bosseno, R., Vacher, J. J. y Seguin, B. (1999). Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(2), 113–137. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00002-7)

Giorgi, F., Hurrell, J. W., Marinucci, M. R. y Beniston, M. (1997). Elevation dependency of the surface climate change signal: A model study. *Journal of Climate*, 10(2), 288–296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<0288:EDOTSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<0288:EDOTSC>2.0.CO;2)

Harris, S. A. (1981). Climatic relationship of permafrost zones in areas of low winter snow-cover. *Arctic*, 34(1), 64–70.

INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña). (2018). *Inventario Nacional de Glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú*. Huaraz, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

Mao, K. B., Ma, Y., Tan, X. L., Shen, X. Y., Liu, G., Li, Z. L., Chen, J. M. y Xia, L. (2017). Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years. *Advances in Space Research*, 59(2), 503–512. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.007>

Nelson, F. E. y Outcalt, S. I. (1987). A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arctic and Alpine Research*, 19(3), 279–288. <https://doi.org/10.2307/1551363>

OMM (Organización Meteorológica Mundial). (2018). *Guía de instrumentos y métodos de observación*. Ginebra, Organización Meteorológica Mundial.

Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala,

I., Schöner, W., Severski, I., Shagedanova, M., Wang, M. B., ... Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>

Ran, Y. H., Li, X. y Jin, R. (2012). Estimation of the mean annual surface temperature and surface frost number using the MODIS land surface temperature products for mapping permafrost in China. *Proceedings of Tenth International Conference on Permafrost*, Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012, 317–321.

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>

Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado-Casimiro, W. S. y Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research*, 120(9), 3745–3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>

Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>

Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. y Li, Z.-L. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 163–180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7)

Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., Sampson, C. C., Kanae, S. y Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>

Gestión Ambiental y Protección Jurídica de los Glaciares en el Perú

Environmental Management and Legal Protection of Glaciers in Peru

Zarela Reyes Cubas¹

¹ Consultora ambiental, Lima

Resumen

El objetivo de esta investigación fue determinar si el marco jurídico peruano permite una adecuada gestión ambiental de los glaciares. Para ello, se revisaron las principales normas jurídicas y políticas públicas sobre glaciares y materias conexas. Los resultados generales señalan que, a nivel normativo: 1) se carece de una definición jurídica de glaciar, 2) se fracciona la gestión de los glaciares entre los sectores ambiente y agrario, 3) los glaciares no han sido incluidos adecuadamente en el Sistema Nacional de Gestión Ambiental, y 4) se adolece de una norma jurídica especial sobre la materia. En el aspecto político: 1) se carece de una política nacional sobre glaciares y 2) las políticas públicas sectoriales no han incluido apropiadamente a los glaciares. Por lo cual, se requiere de una política nacional y de una ley general de glaciares.

Palabras clave: *Glaciares, políticas públicas, derecho ambiental*

Abstract

The objective of this research was to determine if the Peruvian legal framework allows adequate environmental management of glaciers. For this, the main legal regulations and public policies on glaciers and related matters were reviewed. The general results indicate that, at the regulatory level: 1) there is no legal definition of a glacier, 2) the management of glaciers is divided between the environmental and agricultural sectors, 3) glaciers have not been adequately included in the National Environmental Management System, and 4) there is no special legal rule on the matter. In the political aspect: 1) there is no national policy on glaciers and 2) sectoral public policies have not properly included glaciers. Therefore, a national policy and a general glacier law are required.

Keywords: *Glaciers, public policy, environmental law*

Introducción

Los glaciares son ecosistemas complejos que tienen relaciones sociales, culturales y económicas con las poblaciones asentadas desde la alta montaña hasta el litoral y la Amazonía. Se encuentran presionados por las actividades antropogénicas y los efectos del cambio climático. En tal sentido, la gestión de los glaciares requiere de instrumentos legales diseñados a partir de un correcto entendimiento de su dinámica ecosistémica, enfocados en su conservación, la seguridad hídrica, la prevención de desastres naturales y la continuidad de sus manifestaciones culturales a fin de prevenir conflictos socioambientales. Por ello, es pertinente analizar la situación actual de la protección jurídica otorgada por el Estado peruano.

Aspectos Jurídicos de los Glaciares

Los glaciares deben ser reconocidos como objetos de tutela jurídica, en los términos generales señalados por Von Liszt (1999, citado por Kierszenbaum, 2009, p. 188): “un interés vital para el desarrollo de los individuos de una sociedad determinada, que adquiere reconocimiento jurídico”. En tal sentido, son bienes jurídicos aquellos que la Constitución o la ley reconozcan como tales. Este reconocimiento implica que el Estado debe garantizar su protección, cumpliendo así una función instrumental. De esta forma, el reconocimiento legal de los glaciares como bienes merecedores de tutela del Estado es trascendental para su gestión ambiental.

Como un Derecho Fundamental

La Constitución Política del Perú (CPP, 1993), en Artículo 2 numeral 22, consagra el derecho fundamental de la persona humana a “gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”. Al respecto, la sentencia del Expediente N° 0048-2004-PI/TC (2005) del Tribunal Constitucional precisa que el contenido de este derecho fundamental está determinado por: a) el derecho a gozar de ese ambiente y b) el derecho a que se preserve ese ambiente. Luego, el Tribunal Constitucional, en la sentencia del Expediente N° 9340-2006-PA/TC (2007), señala que este derecho tiene dos dimensiones: prestacional y reaccional. La primera impone al Estado obligaciones destinadas a

conservar el ambiente equilibrado. La segunda consiste en la obligación del Estado de abstenerse de realizar cualquier acto que afecte al ambiente. En este orden de ideas, la protección y la prevención de daños a los glaciares se vinculan con el goce del derecho fundamental a vivir en un ambiente adecuado para la vida humana, pues contribuyen a la provisión de agua, la seguridad alimentaria, la prevención de desastres naturales y las relaciones culturales.

Como Patrimonio de la Nación

La CPP establece en el Artículo 66 que “los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación” siendo el Estado “soberano en su aprovechamiento”. Al respecto, la Ley N° 26821 (1997) precisa que un recurso natural es “todo componente de la naturaleza susceptible de ser aprovechado por el ser humano para la satisfacción de sus necesidades y que tengan un valor actual o potencial en el mercado”, tales como la diversidad biológica (flora, fauna, microorganismos, genes y los ecosistemas que dan soporte a la vida), las aguas (superficiales y subterráneas) y otros. Además, “los recursos naturales mantenidos en su fuente sean estos renovables o no renovables, son Patrimonio de la Nación” (Ley N° 26821, 1997, Artículo 4). Asimismo, la Ley General del Ambiente, Ley N° 28611 (2005), reconoce que “los recursos naturales constituyen Patrimonio de la Nación”. Al respecto, Huapaya Tapia (2014, págs. 336-337) sostiene que el reconocimiento de “patrimonio de la nación” implica que: 1) los beneficios derivados del aprovechamiento de los recursos naturales deben alcanzar a la Nación en su conjunto, y 2) el Estado ejerce un dominio estatal (eminente) sobre ellos, en virtud del cual legisla, administra y planifica su aprovechamiento. En este orden de ideas, los glaciares mantenidos en su fuente gozan de la condición de los recursos naturales por ser: 1) parte de la diversidad biológica pues son ecosistemas que dan soporte a la vida, y 2) agua superficial o subterránea. Además, forman parte del patrimonio de la nación, por lo tanto, todos los peruanos deben gozar de los beneficios que brindan y el Estado está autorizado a establecer medidas legislativas y administrativas para su gestión (limitaciones al dominio, obligaciones derivadas de la función social de la propiedad, restricciones de acceso y uso, prohibiciones y sanciones).

Gestión Ambiental de los Glaciares

El Sistema Nacional de Gestión Ambiental (SNGA), creado por la Ley N° 28245 (Decreto Supremo No 029-2018-PCM, 2005) integra la gestión ambiental del país. Por tanto, corresponde analizar la incorporación de la gestión de los glaciares en los cinco sistemas funcionales del SNGA.

Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNRH)

El SNRH conduce la gestión de los glaciares en su calidad de recurso hídrico, asimilándolos a la consecución

de su finalidad y objetivos de creación. Asimismo, presenta dos avances importantes para la gestión de los glaciares: 1) su inclusión en la definición de recursos hídricos y 2) el reconocimiento de la cuenca hidrográfica como unidad de gestión. Sin embargo, la Ley de Recursos Hídricos (Ley No 29388 (2009) no diferencia a los glaciares de los otros recursos hídricos, omitiendo establecer disposiciones especiales sobre estos, como lo hace para las aguas amazónicas y el cambio climático.

Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)

El SEIA solo comprende a los proyectos de exploración de mediana y gran minería ubicados a menos de 100 metros de distancia en línea horizontal y perpendicular de la huella máxima de ocupación en invierno de un glaciar. Además, solo el sector minero ha incorporado disposiciones sobre los glaciares en sus reglamentos de protección ambiental. En tal sentido, el SEIA tiene como reto incorporar a los glaciares en: 1) la lista de proyectos incluidos en el SEIA de más sectores, 2) los reglamentos de protección ambiental de los sectores energía, transporte, agricultura y turismo, y 3) los términos de referencia comunes de los estudios ambientales de los proyectos de inversión. También se sugiere realizar una evaluación ambiental estratégica sobre glaciares.

Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (SINEFA)

La contribución del SINEFA a la gestión de los glaciares depende de: 1) la incorporación de obligaciones ambientales en materia de glaciares dentro de la normativa ambiental, los instrumentos de gestión ambiental y los compromisos ambientales de los contratos y concesiones, y 2) la delegación de facultades expresas de fiscalización ambiental en glaciares a las entidades de fiscalización ambiental. Ambos temas aún no han sido desarrollados.

Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SINANPE)

El SINANPE permite la conservación directa de los glaciares que se encuentren dentro de las áreas naturales protegidas (ANP). No obstante, el SINANPE no considera a los glaciares como bienes jurídicos objetos de protección específica, pues solo protege a los glaciares cuando estos son objetivos de creación de las ANP¹. Por ello, es relevante contar con una representación regional y zonal de los glaciares dentro del SINANPE (para el caso de Chile, véase Segovia Rocha, 2015). Al respecto, de acuerdo con la lista oficial de ANP, cinco de las 66 ANP de

¹ Se ha revisado la lista oficial de áreas naturales protegidas publicada por el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado y actualizada al 3 de marzo de 2020. Disponible en: <https://www.sernanp.gob.pe/documents/10181/165150/Listado+ANP+03.03.2020.pdf/47f02d7d-ee04-4e82-8c64-1d41668c92ff>.

nivel nacional, una de las nueve Zonas Reservadas², dos de las 25 ACR y cuatro de las 147 ACP están relacionados con los glaciares. En tal sentido, el SINANPE es insuficiente para proteger a los glaciares pues: 1) no todos los glaciares se encuentran dentro del SINANPE, 2) aquellos que se encuentran dentro del sistema no configuran una muestra significativa de los mismos, y 3) no todas las ANP que albergan glaciares son de protección directa. Por ello, el SINANPE debe contar con una muestra representativa de glaciares tropicales y fomentar el reconocimiento de ACR y ACP que alberguen glaciares.

Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA)

El SINIA es esencial para la gestión ambiental de los glaciares, pues sus gestores constantemente necesitan información oportuna para tomar decisiones en un

² No se han considerado a las ANP que consideran dentro de sus objetivos la conservación de ecosistemas relacionados con los glaciares, tales como bofedales o praderas altoandinas (Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D'Achille y Santuario Nacional de Calipuy) o las cabeceras de cuenca y regulación del recurso hídrico en zonas altoandinas (Santuario Nacional Pampa Hermosa, Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca y el Parque Nacional Otishi).

ambiente altamente dinámico. No obstante, en el Perú existen dificultades para generar información pertinente sobre glaciares (MINAM, 2016).

Diseño Institucional

Se evidencia un diseño bipartito de la institucionalidad nacional sobre glaciares (Tabla 1). Por un lado, los glaciares como componentes de biodiversidad son gestionados por el sector ambiente, siendo el INAIGEM su máxima autoridad en investigación científica, con el apoyo del SENAMHI y el SERNANP. Este último está encargado de su gestión directa siempre que un ANP albergue glaciares. Por otro lado, los glaciares, en su calidad de recurso hídrico son gestionados por la ANA, autoridad competente para otorgar derechos de aprovechamiento, conservar su cantidad/calidad y declarar su agotamiento.

Por su parte, los gobiernos regionales y locales no han integrado a los glaciares en sus principales herramientas de gestión, pese a que gozan de competencias ambientales que les permiten gestionar los glaciares dentro de sus jurisdicciones.

Tabla 1. Marco institucional a nivel de la administración nacional.

Sector	Entidad	Competencias relacionadas con la gestión ambiental de glaciares
Ambiente	MINAM	<ul style="list-style-type: none"> - Aprueba el Plan Nacional y la Estrategia Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. - Forma parte del Consejo Directivo del INAIGEM. - Conduce y monitorea la elaboración e implementación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático. - Participa en la formulación de normas en materia de cambio climático. - Diseña y aprueba la política y estrategia nacional del Ambiente y de los recursos naturales.
	INAIGEM	<ul style="list-style-type: none"> - Autoridad nacional científica en glaciares y ecosistemas de montaña. - Fomenta y expande la investigación en glaciares y ecosistemas de montaña. - Formula y propone la aprobación y ejecuta la Política Nacional y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. - Realiza cada cinco años el Inventario Nacional de Glaciares, Lagunas y Bofedales, determinando su cantidad, estado y superficie. - Emite opinión técnica respecto del ámbito de su competencia.
	SENAMHI	<ul style="list-style-type: none"> - Suministra información y formula estudios e investigaciones que satisfacen las necesidades de desarrollo en lo concerniente a las diferentes áreas de la meteorología, hidrología, agrometeorología y otras conexas.
	SERNANP	<ul style="list-style-type: none"> - Gestiona directamente los glaciares que se encuentran dentro de las ANP.
Agrario	MINAGRI	<ul style="list-style-type: none"> - Ente rector del Sector Agrario, al que pertenecen los recursos hídricos. - Diseña y aprueba el Plan y la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. - Propone planes, estrategias, normas, lineamientos, programas y proyectos para mejorar la reducción de la vulnerabilidad y su adaptación al cambio climático en el Sector Agricultura
	ANA	<ul style="list-style-type: none"> - Ente rector del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos. - Otorga derechos de aprovechamiento sobre los recursos hídricos (glaciares) - Participa del monitoreo de evolución de glaciares y lagunas altoandinas.

Fuente: Elaboración propia.

Aspectos de Políticas de Alcance Nacional

El Perú no cuenta con políticas públicas³ específicas sobre glaciares. Las políticas sectoriales sobre los recursos hídricos y la investigación científica incluyen a los glaciares con referencias explícitas. Sin embargo, no incluyen medidas de gestión. Además, las políticas públicas sobre seguridad alimentaria, energía y desastres naturales no hacen referencia a los glaciares. En tal sentido, no existen políticas directas o indirectas que ayuden a la gestión de los glaciares, pero existen algunos avances sobre los cuales se puede construir una futura política nacional sobre glaciares, un hito principal para su gestión (Osterling, 2018).

Propuestas para el Fortalecimiento de la Gestión de los Glaciares

Para fortalecer el marco legal y político de gestión de los glaciares se requiere de una política nacional de glaciares arraigada en los ecosistemas de montaña desde una perspectiva de cuenca hidrográfica, concordada con las demás políticas públicas y construida en torno a tres ejes estratégicos: generación de conocimiento, consolidación institucional y gestión ambiental. Además, se requiere de una ley de presupuestos mínimos para su gestión, concordante con legislación en materia conexa y articulada al SNGA. Tal norma debe: a) definir a los glaciares (aspectos físicos, biológicos y sociales), b) determinar el bien jurídico objeto de protección (aspectos normativos y políticos), c) consolidar el diseño institucional y d) plantear lineamientos generales para su gestión (actividades permitidas, prohibidas y restringidas)

Conclusiones

El derecho nacional no ha desarrollado un marco jurídico sólido para la gestión ambiental de los glaciares toda vez que: 1) carece de una definición legal sobre glaciares, 2) reconoce a los glaciares como recurso hídrico y/o componente de la diversidad biológica, 3) fracciona la gestión de los glaciares en los sectores ambiente y agrario, y 4) adolece de una norma jurídica especial sobre la materia. A nivel regional y local se evidencia una despreocupación por la gestión de los glaciares. Asimismo, no existe una política nacional sobre glaciares y las políticas públicas sectoriales no los han incluido apropiadamente. Por ello, se requiere de una ley general y una política nacional de glaciares.

³ De acuerdo al "Reglamento que regula las Políticas Nacionales" (Decreto Supremo No 029-2018-PCM, 2018), las políticas de alcance nacional son las Políticas de Estado y las Políticas Nacionales. Las primeras, definen lineamientos generales que orientan el accionar del Estado en el largo plazo para lograr el bienestar y el desarrollo sostenible en el país, las cuales están contenidas en el Acuerdo Nacional y se concretan en el Plan Estratégico de Desarrollo Nacional (Artículo 6). Las segundas, son decisiones de política para priorizar un conjunto de objetivos y acciones para resolver un problema público de alcance nacional y sectorial o multisectorial en un lapso. Su diseño y ejecución están a cargo de los Ministerios y se enmarcan en las Políticas de Estado (Artículo 8).

Referencias

- CPP (Constitución Política del Perú). (1993). Constitución Política del Perú - 1993. Lima. <http://www.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/Constitucion-Pol%C3%ADtica-del-Peru-1993.pdf>
- Decreto Supremo No 008-2005-PCM. (24 de enero de 2005). Ley N° 28245. Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Normas Legales, No 8995, Diario Oficial "El Peruano", 1 de febrero de 2005. Lima. <https://www.gob.pe/institucion/presidencia/normas-legales/395157-008-2005-pcm>
- Decreto Supremo No 029-2018-PCM. (19 de marzo de 2018). Reglamento que regula las Políticas Nacionales. Normas Legales, No 14445, Diario Oficial "El Peruano", 20 de marzo de 2018. Lima. <https://www.gob.pe/institucion/minjus/normas-legales/1933839-029-2018-pcm>
- Expediente N° 0048-2004-PI/TC. (01/04/2005). Sentencia del Pleno del Tribunal Constitucional. Lima. <http://www.tc.gob.pe/jurisprudencia/2005/00048-2004-AI.pdf>
- Expediente N° 9340-2006-PA/TC. (29/11/2007). Sentencia del Tribunal Constitucional. Lima. <https://www.tc.gob.pe/jurisprudencia/2008/09340-2006-AA.pdf>
- Huapaya Tapia, R. (2014). El régimen constitucional y legal de los recursos naturales en el ordenamiento jurídico peruano. Revista de Derecho Administrativo, 14, 327-339. Recuperado a partir de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoadministrativo/article/view/13455>
- Kierszenbaum, M. (2009). El bien jurídico en el derecho penal. Algunas nociones básicas desde la óptica de la discusión actual. Lecciones y Ensayos, 86, 187-211.
- Ley N° 26821. (25 de junio de 1997). Ley Orgánica para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Normas Legales, No 6207, Diario Oficial "El Peruano", 26 de junio de 1997. Lima. <https://leyes.congreso.gob.pe/documentos/Leyes/26821.pdf>
- Ley N° 28611. (13 de octubre de 2005). Ley General del Ambiente. Normas Legales, No 9252, Diario Oficial "El Peruano", 15 de octubre de 2005. Lima. <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28611.pdf>
- Ley No 29388 (30 de marzo de 2009). Ley de Recursos Hídricos. Normas Legales, No 10562, Diario Oficial "El Peruano", 31 de marzo de 2009. Lima. <https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/29388.pdf>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2016). Gestión transformadora por la sostenibilidad (2011-2016). Avances, logros y retos de la gestión ambiental peruana. Lima, Ministerio del Ambiente.
- Osterling, P. J., Jr. (2018). Lineamientos específicos para la formulación de la propuesta para la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña del Perú. Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, 5, 81-95.
- Segovia Rocha, A. (2015). Glaciares en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). Investigaciones Geográficas, 49, 51-68.
- Von Liszt, F. (1999). Tratado de derecho penal (traducción de la 20.a ed. alemana por Luis Jiménez de Asúa). Q. Saldaña y García-Rubio (Ed.), tomo II, (4.a ed.). Reus, Madrid.

