

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

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

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

¹The Mountain Institute (TMI), Huaraz, Ancash

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

<https://doi.org/10.36580/rgem.i4.57-76>

Resumen

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

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

Abstract

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

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

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

Introducción

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

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

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

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

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

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

Drenaje Ácido de Roca por Retroceso Glaciar

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

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

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

Técnica de Biorremediación

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

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

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

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

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

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

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

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



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

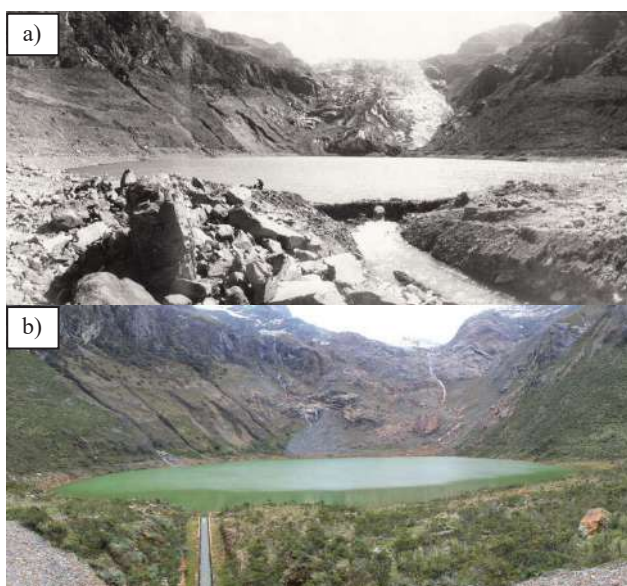


Figura 3. Fotografía de la laguna Shallap: (a) 1972 y (b) 2018, testigo del retroceso glaciar y drenaje ácido de roca. Fotos: UGRH.



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

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

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

Metodología: Área y Sitios de Estudio

C.C. Cordillera Blanca, Recuay, Ancash

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

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

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

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

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

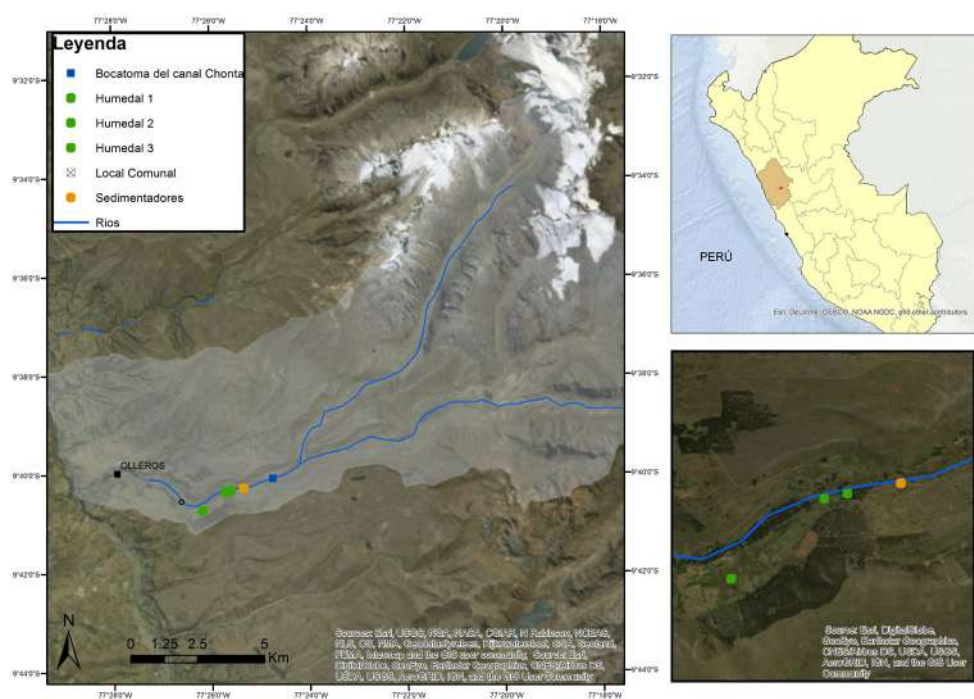


Figura 5. Ubicación del sistema de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca.

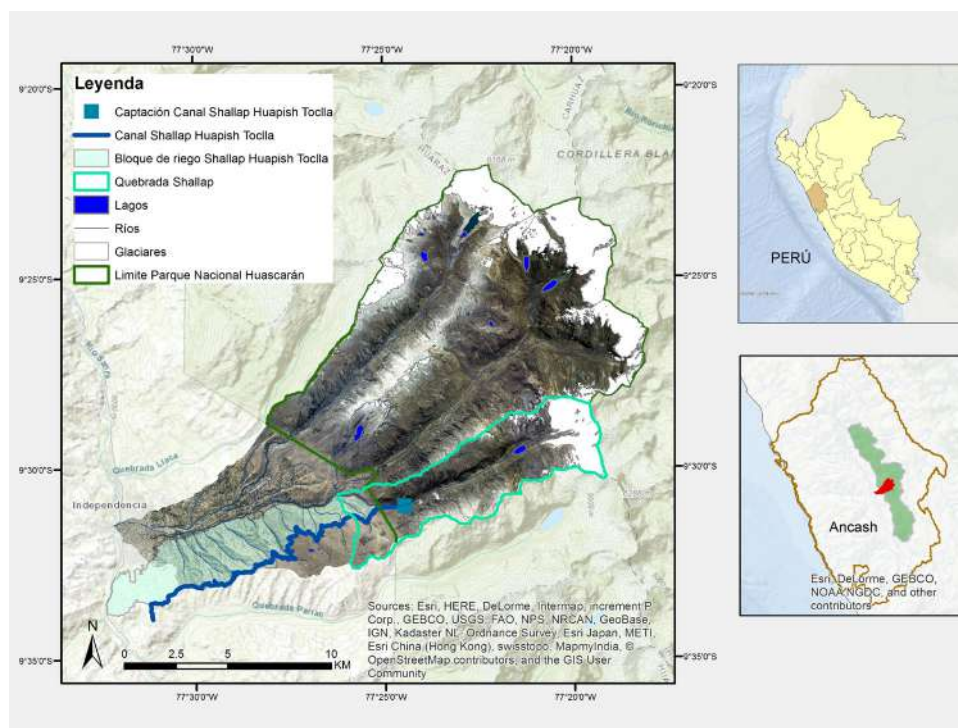


Figura 6. Ubicación del canal matriz Shallap-Huapish-Toclla en el ámbito de la subcuenca Quillcay.

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

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

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

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

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

Saberes Locales, Investigación, Acción Participativa y Conocimiento Científico

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

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

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

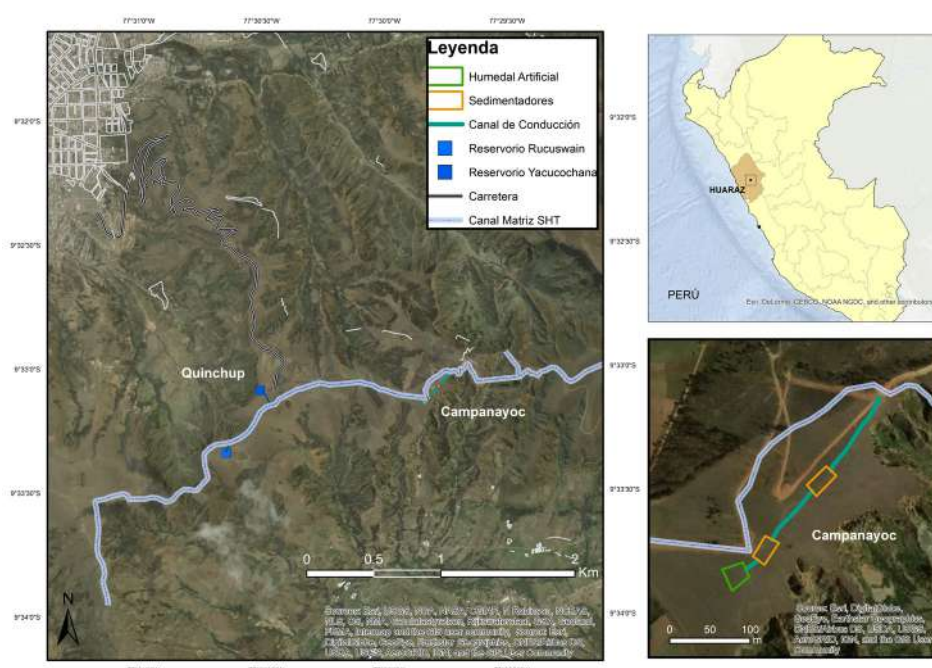


Figura 7. Ubicación del sistema de biorremediación del C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

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



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

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Biorremediación

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

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

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

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

Componente Físico del Sistema de Biorremediación

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

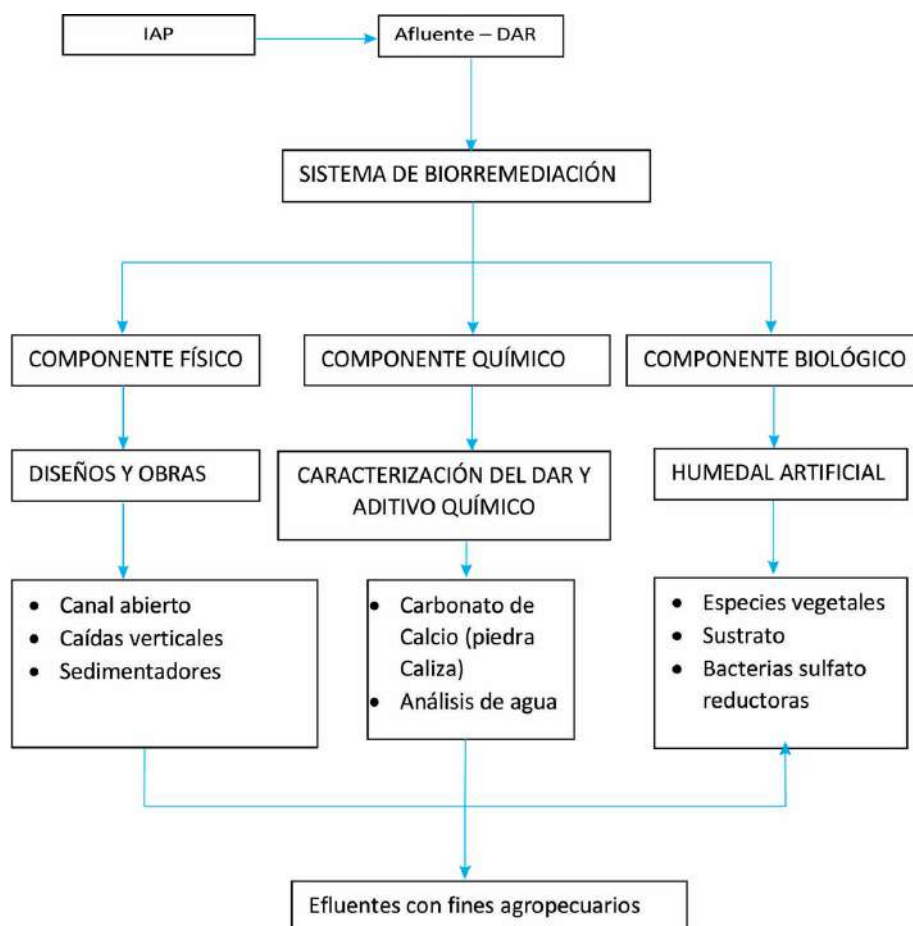


Figura 9. Flujograma de la aplicación de los tres componentes al DAR.

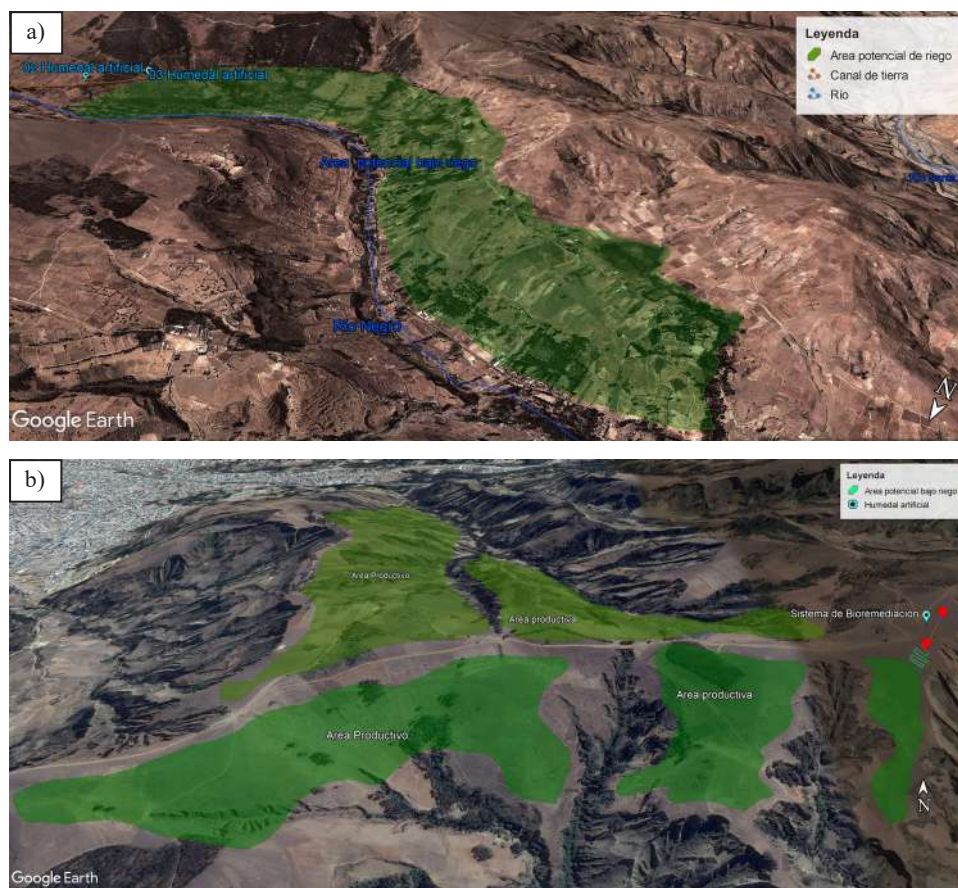


Figura 10. Áreas potencialmente productivas: a) C.C. Cordillera Blanca, b) C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

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

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

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

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

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

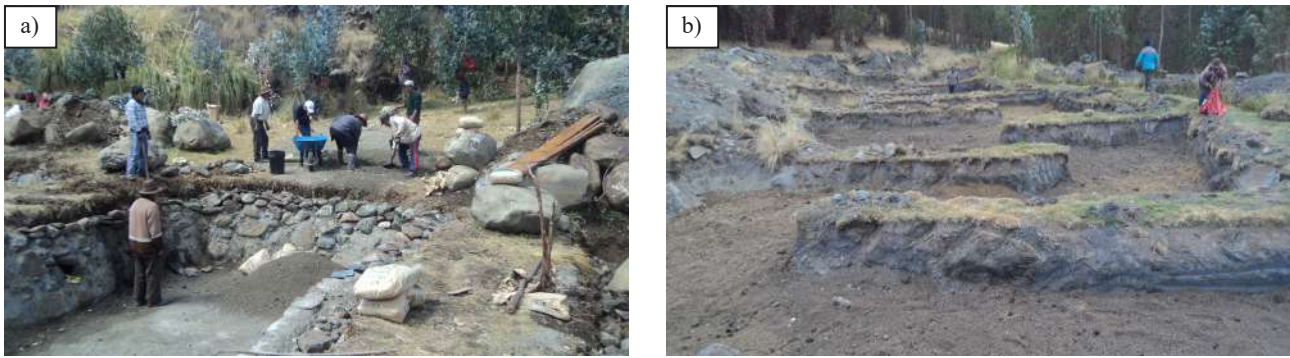


Figura 11. Proceso de construcción del sistema de biorremediación de la C.C. Cordillera Blanca: (a) sedimentadores y (b) humedales, 2014. Fotos: TMI.

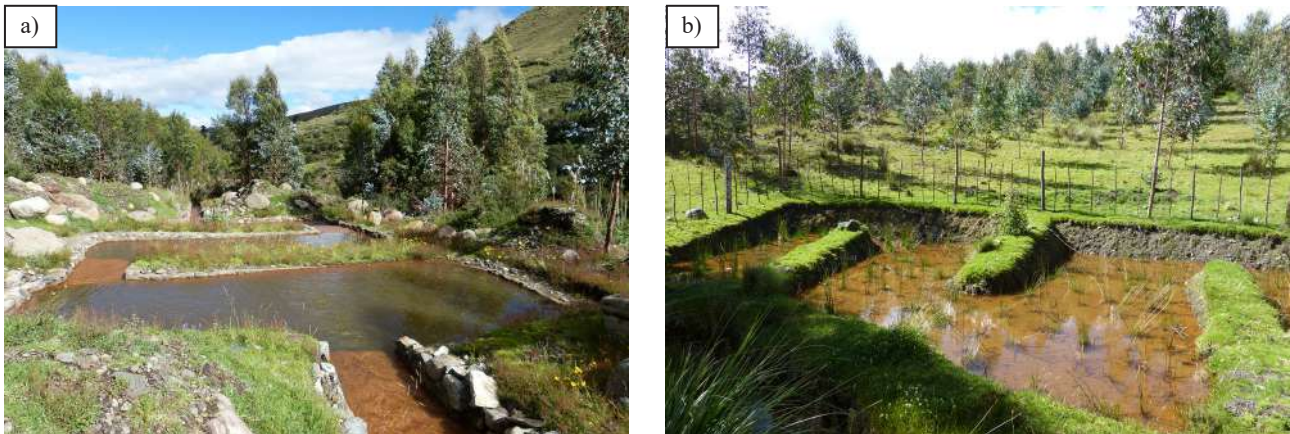


Figura 12. Sistema de biorremediación finalizado de la C.C. Cordillera Blanca: (a) sedimentadores y (b) humedales, abril 2015. Fotos: A. Zimmer.

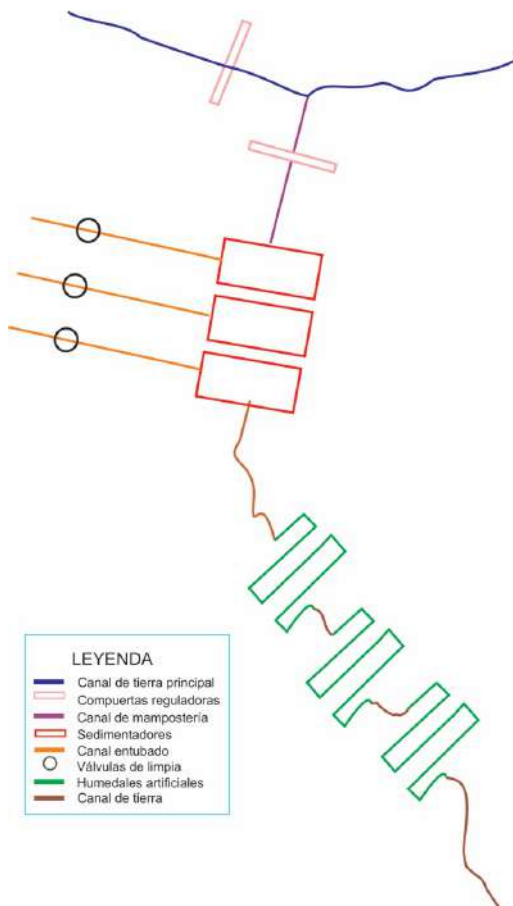


Figura 13. Estructuras hidráulicas construidas por la C.C. Cordillera Blanca.

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

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



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

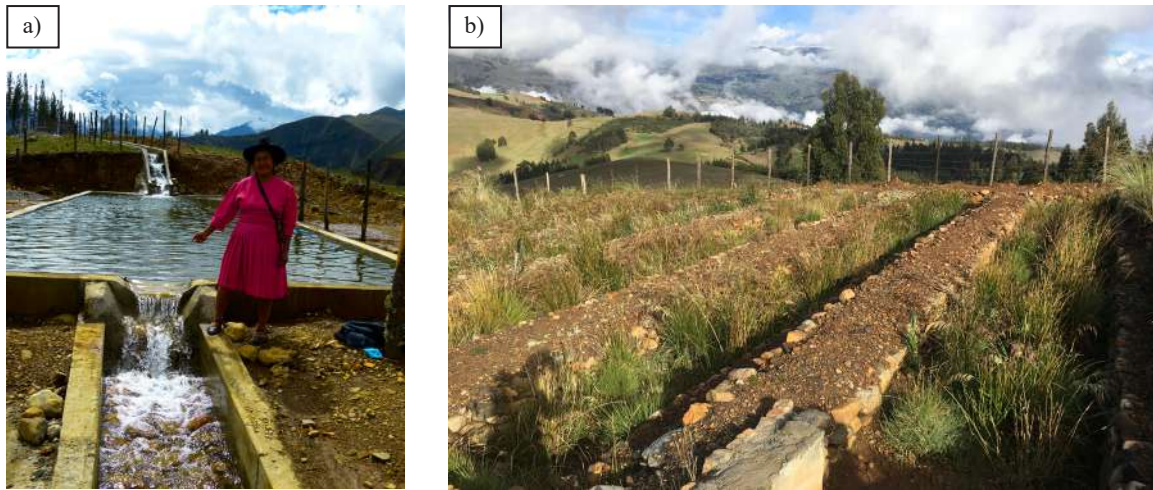


Figura 15. Sistema de biorremediación finalizado del C.U. Shallap-Huapish-Toclla: (a) sedimentadores y (b) humedales, 2017. Fotos: A. Zimmer.

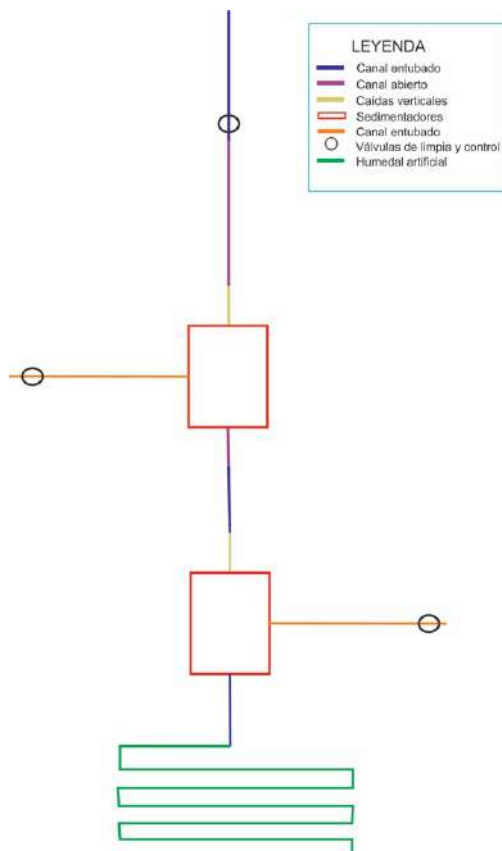


Figura 16. Estructuras hidráulicas construidas por el C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

Componente Químico

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

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

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

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

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

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

Componente Biológico

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

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

Bacterias Sulfatorreductoras

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

Tabla 1. Sustratos de los dos sistemas de biorremediación.

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

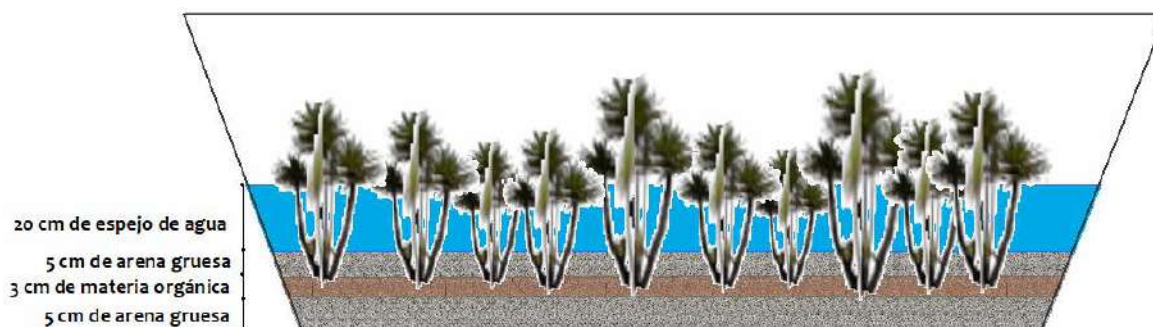


Figura 17. Sustratos del sistema de la C.C. Cordillera Blanca.

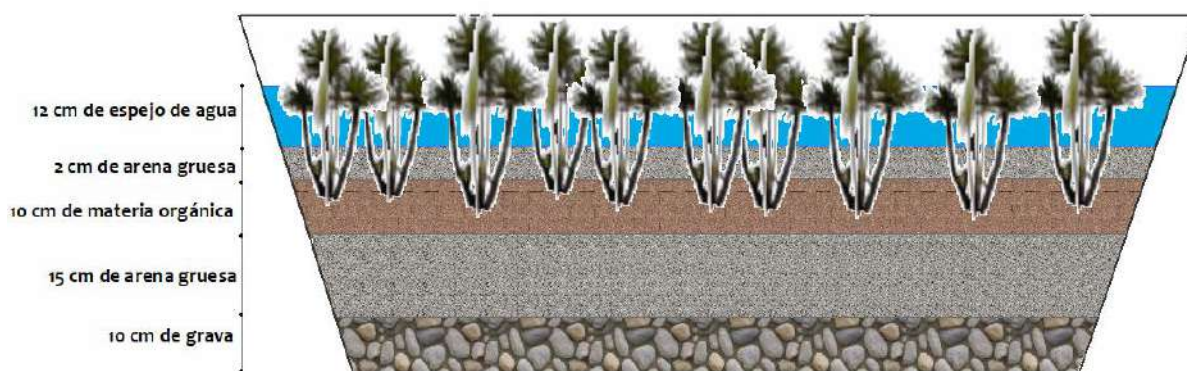


Figura 18. Sustratos del sistema del C.U. Shallap-Huapish-Toclla.

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

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

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

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

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

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

Especies Vegetativas

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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



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



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

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

Conclusiones

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

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

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

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

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

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

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

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

Agradecimientos

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

Referencias

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

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

- (DAM) mediante sistema de humedales. *Libro de resúmenes del IV Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería y Metalurgia*, 32. Lima.
- Postgate, J. R. (1965). Recent advances in the study of the sulfate-reducing bacteria. *Bacteriological Reviews*, 29(4), 425-441.
- Quesquén Rumiche, A. (2007). *Propuesta de asignación de agua superficial en bloques (volúmenes anuales y mensuales) para la formalización de los derechos de uso de agua en la cuenca alta del río Santa – microcuencas Casca y Monterrey*. Lima, PROFODUA (Programa de Formalización de Derechos de Usos de Agua – FASE II), IRH-INRENA (Intendencia de Recursos Hídricos, Instituto Nacional de Recursos Naturales).
- Rabatel, A. (2005). *Chronologie et interprétation paléoclimatique des fluctuations des glaciers dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du Petit Age Glaciaire (17ème siècle)*. Tesis doctoral. Université Joseph Fourier / Grenoble I, Francia.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L.,... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, 81-102. doi:10.5194/tc-7-81-2013
- Rascio, N. y Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169-181. doi:10.1016/j.plantsci.2010.08.016
- Roberts, A. y Robinson, M. L. (2010). La propagación de las plantas de interior. Cooperative Extension, 99-60 (2 págs.). Reno, Nevada, University of Nevada. <https://www.unce.unr.edu/publications/files/sl/other/FS9960.pdf>
- Sheoran, A. S. y Sheoran, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19(2), 105–116. doi:10.1016/j.mineng.2005.08.006
- Silverio, W. y Jaquet, J. M. (2005). Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342-350. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012
- Todd, A. S., McKnight, D. M., Jaros, C. L. y Marchitto, T. M. (2007). Effects of acid rock drainage on stocked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): An *in-situ*, caged fish experiment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1-3), 111-127. doi:10.1007/s10661-006-9382-7
- UGRH. (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*. Huaraz, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- University of Amsterdam. (2012 – informes inéditos). (1) Driessen, C., Reijman, T. y Tel, T. - Distribution of abiotic factors in Canrey Chico and their relationship to vegetation. (2) Bösken, J. y Van der Meulen, M. - Hydrochemical assessment of the Canrey Chico catchment in the Cordillera Blanca. (3) de Graaf, L. y van Hall, R. L. - The use of soils as a natural buffer for the contaminated waters in the río Negro catchment, Cordillera Blanca, Peru. (4) Stroo, J. I. L. - Postglacial soil development on deglaciated features in the Canrey Chico catchment.
- Vicente, M. S. (2006). *Uso de bacterias sulfato-reductoras inmovilizadas para la precipitación de metales pesados*. Trabajo final de Laboratorio de Procesos Biotecnológicos. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires.
- Villanueva Álvarez, R. C. y Sánchez Pinto, F. R. (2013). *Diseño de tratamiento pasivo después del plan de cierre de mina*. Tesis de Ingeniero Sanitario. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G. y Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Vuori, K.-M. (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici*, 32(3), 317-329.
- Zapata, F. y Rondán, V. (2016). *La investigación acción participativa: Guía conceptual y metodológica del Instituto de Montaña*. Lima, Instituto de Montaña.