

Universidad Peruana Cayetano Heredia
Facultad de Ciencias y Filosofía “Alberto Cazorla Talleri”



Potenciales efectos en la salud de las comunidades situadas en la subcuenca de Quillcay tras exposición a metales pesados (As, Cd, Pb) originados por drenaje ácido de rocas producto del retroceso glaciario - Áncash (Perú)

Trabajo de Investigación para optar el Grado de Bachiller en Ciencias con mención en Biología

Autores:

Luciana Rojas Granda
Ricardo Cristian Rengifo Cortavarría

Asesora:

Dra Stella Hartinger Peña

Lima, Perú

2022

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ESTADO DEL ARTE	6
1. Cambio climático y su relación con el retroceso glaciar	6
1.1. Impacto del calentamiento global en los glaciares tropicales	6
1.2. Retroceso glaciar en la Cordillera Blanca	6
2. Drenaje ácido de roca en la Cordillera Blanca	7
2.1. Geología de las zonas susceptibles a drenaje ácido de rocas	7
2.2. Causas de la generación de drenaje ácido de roca	7
2.3. Contaminación por liberación de metales pesados por drenaje ácido de rocas en las microcuencas Quilcayhuanca y Shallap	8
3. Bioconcentración y bioacumulación de metales pesados en plantas o animales de la zona abastecida por el canal Shallap-Huapish-Toella	10
4. Impactos sobre la salud por exposición a As, Pb y Cd provenientes del drenaje ácido de rocas en la microcuenca Shallap	12
4.1. Enfermedades relacionadas a contaminación ambiental por As, Cd y Pb	12
4.1.1. Exposición a arsénico (As)	12
4.1.2. Exposición a cadmio (Cd)	14
4.1.3. Exposición a plomo (Pb)	15
4.2. Factores de riesgo poblacionales	16
5. Uso de encuestas sociodemográficas en estudios epidemiológicos que abordan la concentración de metales pesados	17

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN	22
Área de estudio	22
Monitoreo de la concentración de metales pesados en muestras biológicas	22
Encuestas sociodemográficas	23
Monitoreo de la calidad ambiental del agua del río Shallap, del canal Shallap-Huapish-Toclla, de las principales fuentes de agua de consumo y de las plantas o vegetales de autoconsumo	24
REFERENCIAS	26
ANEXOS	31

RESUMEN

El calentamiento global es uno de los efectos más severos del cambio climático, lo cual se evidencia a través de su impacto en la dinámica de los glaciares tropicales alrededor del mundo (1). El Perú posee el 70% de dichos ecosistemas montañosos tropicales a nivel global y es Áncash la región que alberga la zona glaciaria de mayor extensión: la Cordillera Blanca (8). La subcuenca de Quillcay es alimentada por glaciares de esta cordillera y está comprendida por las microcuencas Cojup, Quilcayhuanca y Shallap, que constituyen fuentes de agua para las actividades socioeconómicas de centros poblados aledaños. Sin embargo, en las microcuencas Shallap y Quilcayhuanca, se ha detectado la presencia de metales pesados altamente tóxicos como arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb), lo cual es atribuible exclusivamente al drenaje ácido de rocas (DAR) generado por el retroceso glaciario, ya que no existe actividad minera en la zona (9, 13, 20).

Si bien la presencia de estos metales pesados provenientes del DAR ha sido reportada en la subcuenca de Quillcay, sobre todo en la microcuenca Shallap (14, 15, 16, 17, 18), no existen estudios que señalen los potenciales efectos de la exposición a metales pesados en la salud de los pobladores de las comunidades que utilizan como recurso hidrológico los cuerpos de agua de las microcuencas afectadas por el DAR. Por esto, considerando el uso del canal Shallap-Huapish-Toclla como vía de exposición a metales pesados, el presente proyecto propone determinar los potenciales efectos en la salud de las comunidades situadas en la subcuenca de Quillcay que puedan estar relacionados a la exposición a metales pesados (As, Cd, Pb) generados por el drenaje ácido de rocas tras el retroceso glaciario.

Para ello se plantea un estudio de tipo cohorte longitudinal donde se reclutará a las familias que refieran el uso del canal Shallap-Huapish-Toclla para confirmar su participación en el proyecto

durante dos años consecutivos, donde se extraerán muestras biológicas y ambientales cada 3 meses. Las muestras biológicas se obtendrán según el metal pesado, principalmente sangre (Pb) y orina (As y Cd). Además se les tomará una encuesta sociodemográfica para identificar posibles factores de riesgo y vías de exposición a metales pesados. Las muestras ambientales corresponden al agua del río Shallap, la del canal de regadío, la de las fuentes de agua de consumo y al análisis de la concentración de metales en las raíces de los cultivos ingeridos por las familias y en el suelo donde crecen.

Palabras clave: cambio climático, metales pesados, DAR, subcuenca de Quillcay, exposición ambiental.

ABSTRACT

Global warming is one of the most severe effects of climate change, which is evidenced by its impact on the dynamics of tropical glaciers around the world (1). Peru possesses 70% of the world's tropical mountainous ecosystems and Ancash is the region that houses the largest glacial area: the Cordillera Blanca (8). The Quillcay sub-basin is supplied by glaciers from this mountain range and comprises the Cojup, Quilcayhuanca and Shallap micro-basins, which are sources of water for the socioeconomic activities of neighboring population centers. However, in the Shallap and Quilcayhuanca micro-basins, the presence of highly toxic heavy metals such as arsenic (As), cadmium (Cd) and lead (Pb) has been detected, which is exclusively attributable to acid rock drainage (ARD) generated due to glacial retreat, since there is no mining activity in the area (9, 13, 20).

Although the presence of these heavy metals from ARD has been reported in the Quillcay sub-basin, especially in the Shallap micro-basin (14, 15, 16, 17, 18), there are no studies that

indicate the potential effects of exposure to heavy metals in the health of the inhabitants of the communities that use the water bodies of the micro-basins affected by the DAR as a hydrological resource. For this reason, considering the use of the Shallap-Huapish-Toclla irrigation canal as a route of exposure to heavy metals, this project proposes to determine the potential effects on the health of the communities located in the Quillcay sub-basin that may be related to exposure to heavy metals (As, Cd, Pb) generated by acid rock drainage after glacial retreat.

For this purpose, a longitudinal cohort study is proposed where families who refer to the use of Shallap-Huapish-Toclla irrigation canal will be recruited to confirm their participation in the project for two consecutive years, where biological and environmental samples will be extracted every 3 months. Biological samples will be obtained according to the heavy metal, mainly blood (Pb) and urine (As and Cd). In addition, a sociodemographic survey will be taken to identify possible risk factors and routes of exposure to heavy metals. The environmental samples correspond to the water from the Shallap River, the irrigation canal, the sources of drinking water and the analysis of the concentration of metals in the roots of the crops ingested by the families and in the soil where they grow.

Keywords: climate change, heavy metals, ARD, Quillcay sub-basin, environmental exposure.

ESTADO DEL ARTE

1. Cambio climático y su relación con el retroceso glaciar

1.1. Impacto del calentamiento global en los glaciares tropicales

El calentamiento global es uno de los efectos más severos del cambio climático y una de las consecuencias más evidentes de esta problemática ambiental es el retroceso glaciar. Los glaciares tropicales de montaña son altamente sensibles a perturbaciones climáticas en las precipitaciones, la temperatura del aire y la humedad atmosférica (1,2). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), esto se puede evidenciar al observar los cambios en la dinámica y en la extensión de glaciares tropicales alrededor del mundo (3, 4).

El retroceso de los glaciares altera la frecuencia de la descarga y el transporte de sedimentos aguas abajo, lo cual tiene implicaciones importantes en los servicios ecosistémicos que brindan los ríos alimentados por los glaciares (5). Por tanto, las aguas cuya fuente hidrológica sean los glaciares corren el riesgo de disminuir a un ritmo acelerado, evento que afectaría a las comunidades ubicadas pendiente abajo sobre todo por su dependencia a la agricultura y ganadería (5, 6, 7).

1.2. Retroceso glaciar en la Cordillera Blanca

La región más grande con glaciares en el Perú es la Cordillera Blanca que está localizada en la región Áncash (**Anexo 1**) y es una zona altamente vulnerable al cambio climático y a la recesión de los glaciares como consecuencia de este (6, 8). Distintos estudios encontraron una pérdida de superficie glaciar en la Cordillera Blanca del 43% desde 1930 hasta 2016 y del 33.5% entre 1975 y 2016, lo cual señala la aceleración del retroceso glaciar en los últimos 41 años (8). Se

ha estimado que la tasa de reducción para cordilleras pertenecientes a la zona norte del país, entre ellas la Cordillera Blanca, es de 1.6013 km²/año (9).

Los glaciares de la Cordillera Blanca alimentan a la cuenca del río Santa, la cual se divide en subcuencas. Una de estas es la subcuenca de Quillcay, conformada por tres microcuencas: microcuenca Cojup, microcuenca Quilcayhuanca y microcuenca Shallap (9) (**Anexo 2**). Se ha reportado que en el periodo de 1987 al 2010, la subcuenca del Quillcay ha experimentado retroceso glaciar y ha sufrido una pérdida de aproximadamente 11.5 km² de su área glaciar (**Anexo 3 y Anexo 4**), situándose como la tercera subcuenca más afectada de las 11 evaluadas en un estudio realizado por Burns en el año 2014 (10).

2. Drenaje ácido de roca en la Cordillera Blanca

2.1. Geología de las zonas susceptibles a drenaje ácido de rocas

Uno de los más grandes yacimientos de piedras ricas en sulfuros metálicos se localiza en la Cordillera Blanca, lo cual se debe a la presencia de la formación Chicama, constituida por rocas sedimentarias metamórficas mesozoicas, principalmente pirita (FeS₂) (11). Las microcuencas de la subcuenca del Quillcay se asientan principalmente sobre intrusivos del batolito de la Cordillera Blanca y sobre la formación Chicama. El hecho de situarse sobre este tipo de yacimientos condiciona a las microcuencas a ser alteradas por estar expuestas al drenaje ácido de rocas (9).

2.2. Causas de la generación de drenaje ácido de roca

El retroceso glaciar expone los minerales ricos en sulfuros metálicos al oxígeno atmosférico y al agua, que son elementos ambientales que propician reacciones de oxidación y lixiviación

(9). Estas reacciones conllevan a un fenómeno denominado “drenaje ácido de rocas (DAR)”, el cual se desencadena cuando la oxidación de la pirita forma ácido sulfúrico que disuelve metales de las rocas y que también causa la disminución del pH del agua por la liberación de protones (11). El pH bajo, a su vez, permite que metales en su forma catiónica se mantengan estables disueltos en el agua, por lo que aguas acidificadas naturalmente tienden a presentar metales disueltos (11).

Algunos de los metales liberados en el drenaje ácido de rocas son inocuos en bajas concentraciones, tales como el cobre, zinc, cobalto y manganeso, mientras que otros metales liberados son nocivos incluso a bajas concentraciones (12). Este último grupo hace referencia a metales pesados como el arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg) (12).

2.3. Contaminación por liberación de metales pesados por drenaje ácido de rocas en las microcuencas Quilcayhuanca y Shallap

En las últimas décadas, se han descrito distintos casos a nivel mundial que evidencian que el cambio climático promueve la liberación de metales pesados al agua a través del proceso del DAR; esto ha sido visualizado en Montañas Rocosas (Colorado, EEUU), Territorio de Yukon (Canadá), el Himalaya y los Alpes europeos (8). En el caso de Perú, se ha reportado que, en la Cordillera Blanca, las microcuencas Shallap y Quilcayhuanca están siendo afectadas paulatinamente por el drenaje ácido de rocas producto del retroceso glaciar (9). Esto se documenta en varios estudios a través de la detección de un pH bajo y la presencia de metales pesados en distintos puntos de muestreo de ambas microcuencas. En estos estudios se reportan metales pesados como As, Cd y Pb en los cuerpos de agua evaluados (13, 14, 15).

En la microcuenca Quilcayhuanca se encontró que los valores de concentración máxima de Pb excedían los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y estándares peruanos para agua potable (**Anexo 5 y Anexo 6**) (16). Asimismo, el promedio anual de As y Cd en sedimentos correspondiente al punto de muestreo de la laguna Shallap (subcuenca de Quillcay) excede los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) vigentes para suelos agrícolas (**Anexo 7**) (17). Se descarta que la detección de metales pesados sea atribuible a actividades mineras debido a que no se reportan este tipo de actividades en la zona, por lo que se concluye que la presencia de metales pesados proviene del drenaje ácido de rocas generado en la zona (9).

El agua de las microcuencas Shallap y Quilcayhuanca es utilizada para consumo humano y como recurso hídrico para actividades agrícolas. Existen canales de regadío cuya agua es canalizada a partir de cuerpos hidrológicos que presentan metales pesados debido al retroceso glaciar y la acidificación natural previamente descrita (**Anexo 8**). Uno de ellos es el canal Shallap-Huapish-Toclla (**Anexo 9**), abastecido por el río Shallap, el cual abarca un área de actividad agrícola de aproximadamente 2520 hectáreas que abastece a 3040 familias (**Anexo 10 y Anexo 11**), según lo reportado en el año 2016 por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) (18). Cabe destacar que, en el año 2014, el agua de la captación del canal Shallap-Huapish-Toclla tenía un pH ácido de 4.1 (19).

En los últimos 40 años, las personas pertenecientes al Comité de Usuarios de Agua Shallap-Huapish-Toclla han señalado que la calidad del agua de la zona se encuentra alterada, mencionando la desaparición de las truchas, la disminución en la productividad agrícola, la variación del color del agua a tonalidades amarillas y la deposición de sedimentos rojizos sobre las rocas de los ríos (**Anexo 12**) (19). Dada la importancia de este canal, se construyó un humedal de biorremediación para tratar de disminuir los efectos del DAR sobre el agua que

abastece el canal Shallap-Huapish-Toclla. No obstante, hasta donde se tiene conocimiento, no existe evidencia publicada sobre la eficacia del sistema de biorremediación en cuanto a la disminución de la concentración de metales pesados en el agua (19).

3. Bioconcentración y bioacumulación de metales pesados en plantas o animales de la zona abastecida por el canal Shallap-Huapish-Toclla

En la subcuenca de Quillcay, las principales actividades productivas son la agricultura, la ganadería, y la crianza de animales menores (20, 21). Dentro de esta subcuenca, el canal Shallap-Huapish-Toclla, localizado por encima de los 3000 m.s.n.m., abastece de agua a su respectivo bloque de riego principalmente para actividades agropecuarias de autoconsumo (19, 20). Entre los cultivos que destacan en esta zona altoandina se encuentran la papa, el maíz y el trigo, mientras que los animales de autoconsumo son cuyes, pollos y cerdos (20, 21).

Esta información es importante debido a que, al tratarse de un canal contaminado con metales pesados, a consecuencia del DAR, y utilizado para las actividades previamente mencionadas podría formar parte de una vía de exposición ocupacional (para agricultores o ganaderos) y no ocupacional por ingesta de metales pesados por parte de los pobladores de las comunidades de la subcuenca de Quillcay.

Los metales pesados pueden acumularse en plantas principalmente mediante la absorción de agua con presencia de estos contaminantes –en este caso, provenientes del DAR– a través del sistema radicular, lo cual se conoce como bioconcentración (22). Por otro lado, en organismos (como animales de ganado), los metales pesados pueden ser tomados a partir de componentes abióticos, como el agua, y de la dieta del organismo, lo cual hace referencia a la bioacumulación (22). Asimismo, el contaminante puede incrementarse en su concentración a medida que se

desplaza en niveles sucesivos de la cadena trófica, a lo que se le conoce como biomagnificación (22).

Considerando que la papa constituye parte de la dieta diaria de las comunidades altoandinas, Orellana y colaboradores, en 2020, consideraron relevante evaluar el riesgo en la salud que supone la ingesta diaria de este tubérculo que puede acumular metales pesados en su parte comestible. Para ello, emplearon variables como el factor de bioconcentración (BCF) y el consumo diario estimado de metales (EDIM), entre otras (23).

Por un lado, el factor de bioconcentración (BCF) hace referencia a la capacidad de translocación de los metales pesados del suelo a la parte comestible de la planta (**Anexo 13**) (23). Por otro lado, es necesario evaluar el riesgo para la salud humana por exposición a metales pesados. Para este fin, se puede utilizar el consumo diario estimado de metales (EDIM) cuando se presume que la exposición a dichos metales involucra una vía relacionada con la dieta, como el consumo de alimentos (**Anexo 14**) (23).

Si bien los estudios que traten sobre bioacumulación de metales pesados (liberados de forma natural) en mamíferos son menos comunes que los que hacen referencia a peces e invertebrados, la investigación de procesos de bioacumulación en mamíferos sigue siendo relevante debido a que la acumulación de metales pesados a través de los procesos de bioacumulación y biomagnificación en estos animales (y vegetales) puede llegar a convertirse en una principal vía de exposición a metales pesados en humanos (**Anexo 15**) (22).

4. Impactos sobre la salud por exposición a As, Pb y Cd provenientes del drenaje ácido de rocas en la microcuenca Shallap

4.1. Enfermedades relacionadas a contaminación ambiental por As, Cd y Pb

Los metales pesados pueden ser liberados en el ambiente a través de procesos naturales y de esta manera entrar en contacto con los humanos (24). Por ejemplo, el cadmio puede generarse debido a la meteorización y puede ser transportado por la corriente de los ríos (24). De igual manera, el arsénico puede ser hallado en el agua debido a procesos de lixiviación de depósitos minerales naturales (24). Con respecto al plomo, una forma natural de exposición a este elemento es a través del consumo de vegetales contaminados debido a la alta concentración de metales pesados en los suelos donde fueron cultivados (25). De acuerdo a lo previamente mencionado, otra vía de exposición es la ingesta de alimentos que concentran metales pesados (**Anexo 15**).

Asimismo, la manera en que la salud de las personas se ve afectada dependerá del tipo de metal, la vía de exposición y el tiempo de exposición a los metales pesados (24). El tiempo de exposición a dichos metales definirá si la toxicidad es aguda –un único evento de exposición asociado a un corto periodo de tiempo, generalmente dentro de las últimas 24 horas– o crónica –cuando se refiera a un tiempo de exposición prolongado, usualmente meses o años– (26).

4.1.1. Exposición a arsénico (As)

La principal vía de exposición a arsénico es mediante el consumo de agua contaminada o el uso de la misma para preparar alimentos (24, 27). Asimismo, en cuanto a exposición crónica, una de las vías más reportadas es la ingesta de cultivos que crecieron en suelos contaminados o que fueron regados con agua contaminada (27).

Las especies de arsénico (iAs^{3+} , iAs^{5+}) disueltas en agua pueden absorberse hasta en un 95% a través de la vía digestiva (28). La absorción a través de la piel es alta en condiciones húmedas, de lo contrario, solo alcanza el 2% de absorción (28). Posteriormente, llega a la sangre y dentro de las primeras 24 horas se distribuye entre el hígado, los pulmones, los riñones, el bazo y el tejido óseo (28). Tras las primeras 30 horas se deposita en uñas y cabello. En cuanto a la excreción, se conoce que la vida media del iAs es de 6 horas y difiere con respecto a sus metabolitos de 5,6 - 7,4 horas (28).

Con respecto a los síntomas tras una exposición aguda, se suelen observar vómitos, dolor abdominal y diarrea (27). Por otro lado, la toxicidad crónica de arsénico, llamada arsenicosis, se manifiesta de manera característica en forma de lesiones en la piel, específicamente como pigmentación y queratosis (24). Además, la exposición prolongada a este metal pesado puede inducir distintos tipos de cáncer, cardiopatías, enfermedad arterial periférica y diabetes mellitus (24, 26).

En ese sentido, el arsénico suele monitorearse realizando mediciones de este metal pesado en la orina, sangre, cabello y uñas, considerando que estas muestras reflejan exposiciones ocurridas en el periodo de un año, se comparan los valores obtenidos en la muestra biológica con los valores aceptables de acuerdo a la misma (**Anexo 16**) (29, 30). No obstante, una manifestación que puede ser utilizada para determinar la exposición prolongada al arsénico es la hiperpigmentación en la piel e hiperqueratosis palmoplantar (31).

4.1.2. Exposición a cadmio (Cd)

Una de las vías de exposición a cadmio más conocidas es a través del consumo de comida contaminada con este metal; por ejemplo, si el agua está contaminada, los cultivos pueden bioconcentrar metales y ser consumidos por organismos acuáticos, de esa manera se acumula el cadmio en la cadena trófica y los humanos se ven expuestos al consumirlos (32). Otra vía conocida pero que almacena menor cantidad de cadmio es la bioconcentración en vegetales, cereales o raíces ricas en almidón (32).

Los compuestos que presentan cadmio no suelen ser absorbidos por la piel, mientras que el cadmio que se ingiere es absorbido en bajas cantidades (5-10%) y el que se inhala se absorbe en mayores cantidades (10-50%). El cadmio puede acumularse en músculos, huesos, hígado y riñones y presentan una vida media de 10-30 años debido a sus bajas tasas de excreción (33).

Frente a una exposición aguda, y de ingerirse en altas concentraciones, el cadmio puede generar una irritación estomacal y resultar en vómitos y diarrea (24). Cabe destacar que, frente a una exposición crónica, el cadmio es particularmente tóxico para el riñón y tiende a acumularse en la corteza renal, sobre todo en las células del túbulo proximal de los nefrones tras una exposición prolongada a bajas concentraciones, aunque también puede acumularse en los huesos (24, 26). La exposición crónica al cadmio, por tanto, conlleva a la aparición de enfermedades renales y osteoporosis (24, 26).

Los niveles de cadmio en sangre pueden ser utilizados para evaluar la exposición a este metal, tomando en cuenta que los niveles aceptables de cadmio en sangre en adultos van por debajo de 5 µg/L. Asimismo, los niveles en orina no deben superar los 10 µg/L (34).

4.1.3. Exposición a plomo (Pb)

Una de las principales vías de exposición no ocupacional al plomo es la ingesta de agua contaminada con dicho metal. De igual manera, se conoce que el plomo puede llegar al organismo a través del consumo de alimentos contaminados que lo concentren; por ejemplo, vegetales (34).

En cuanto a la absorción gastrointestinal, de acuerdo a las vías previamente mencionadas, el plomo se absorbe de un 5% al 10%. Cabe resaltar que dicho metal pesado posee una gran afinidad por los eritrocitos (95% del Pb circulante se une a ellos) y por el tejido óseo, debido a que puede sustituir al calcio incluso en concentraciones de orden picomolar, de manera que el 95% del Pb termina por depositarse como fosfatos insolubles de plomo en tejido óseo (24, 35). La vida media del plomo varía entre 15-27 años en adultos y las vías por las que se excreta son la renal y la gastrointestinal, aunque también puede excretarse en sudor, pelos y uñas (35).

Con respecto a sus efectos en la salud, la exposición aguda al plomo puede causar pérdida de apetito, dolores de cabeza, hipertensión, dolor abdominal, disfunción renal, fatiga, insomnio, artritis y vértigo (24). Cabe destacar que su efecto nocivo tras una exposición crónica se manifiesta principalmente en alteraciones en las capacidades cognitivas, como pérdida de memoria, dislexia, retraso mental, y en otras funciones en las que participa el sistema nervioso central (24, 26).

Por otro lado, el monitoreo del plomo en una persona se realiza tomando muestras de sangre (34). Dado que los niños son especialmente vulnerables a este metal, el nivel de referencia se ha determinado en función de ellos y es de 5 µg/dL (36, 37).

4.2. Factores de riesgo poblacionales

De acuerdo con la literatura, existen factores de riesgo que podrían agravar el impacto en la salud de las personas expuestas a metales pesados. Entre ellos están la ocupación (si la persona se dedica a actividades agrícolas donde entre en contacto con agua o suelo contaminados), el grupo etario al que pertenece la persona (si la persona es un infante o un anciano), la presencia de condiciones de salud preexistentes (deficiencias nutricionales o anemia) y también, en el caso de las mujeres, si está gestando.

Por ejemplo, el estudio de los efectos del plomo se suele realizar en niños debido a que son más vulnerables a la exposición a este metal que los adultos, ya que tienen comportamientos que incrementan su exposición a este metal (36). La exposición de este grupo etario recae en la mayor recurrencia de actividades mano-boca, el estar físicamente más cerca del nivel del suelo y el hecho de pasar más tiempo que los demás grupos etarios en los exteriores (36). Las conductas previamente mencionadas conducen a una mayor toma de plomo de suelos contaminados (36). De igual manera, se señala que la absorción de plomo en el tracto gastrointestinal de los niños es mayor a la de los adultos (36). Se ha demostrado que, dentro de los primeros 7 años de vida, existe una relación entre la concentración elevada de plomo en sangre y la disminución del coeficiente intelectual, lo cual fue medido a través de la disminución del puntaje en pruebas de inteligencia (36).

Con respecto al cadmio, la anemia ferropénica y las deficiencias nutricionales incrementan la cantidad de cadmio que puede ser absorbido (38, 29). Estas dos condiciones son muy frecuentes en niños y en mujeres en edad fértil, por lo que se consideran como poblaciones de riesgo frente a la exposición al cadmio (29). Incluso se ha reportado que las mujeres de 50 a 60 años

presentan altos niveles de cadmio en orina y en sangre a comparación de los hombres de edades similares (29).

Por otro lado, en relación a la exposición a arsénico, según Milton, el embarazo puede verse seriamente afectado ya que dicho metal cuenta con la capacidad de atravesar la placenta y, como consecuencia, pueden ocurrir abortos espontáneos o muerte fetal (39).

5. Uso de encuestas sociodemográficas en estudios epidemiológicos que abordan la concentración de metales pesados

Con el fin de entender mejor el contexto poblacional se recopilan variables sociodemográficas de tipo objetivas tales como la edad, el sexo, la educación, el lugar de nacimiento, vivienda, acceso a agua, saneamiento, ocupación (agricultura, ganadería) y nivel de pobreza o ingresos de las personas a evaluar (**Anexo 17**) (40).

Como muestra de la validez de estas variables objetivas, en el año 2019, se tomaron en cuenta características sociodemográficas según la categoría de exposición al arsénico en la provincia de Tacna y se establecieron distintos criterios de inclusión para poder delimitar el estudio, entre ellos el tiempo de residencia en la zona de exposición, la edad y el tiempo de gestación (40).

De igual forma, Almerud y colaboradores, en 2021, ordenan distintas características sociodemográficas como sexo, edad, educación, origen y hábitos de fumar en relación a la concentración de cadmio, plomo y mercurio en la sangre de adolescentes suecos (41). Por tanto, queda demostrado que las encuestas sociodemográficas pueden ser herramientas útiles al momento de determinar los factores de riesgo y cómo estos influyen en la presencia, concentración y tiempo de exposición al metal pesado.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Como se ha señalado previamente, los glaciares tropicales son ecosistemas altamente vulnerables a perturbaciones climáticas, por lo cual se pone en riesgo la disponibilidad de los servicios ecosistémicos que proveen, sobre todo en el contexto actual de crisis climática (1,2). Adicionalmente, se debe resaltar que la región Áncash es una de las más vulnerables a los efectos del cambio climático debido a que alberga la mayor extensión de glaciares tropicales a nivel nacional: la Cordillera Blanca (**Anexo 1**) (6, 8). Los glaciares pertenecientes a esta cadena montañosa cuentan con la función de ser fuente y almacenamiento de recursos hídricos y, por tanto, son indispensables para el desarrollo de las principales actividades socioeconómicas como la agricultura y la ganadería en los centros poblados que dependen de los recursos de dicha cordillera (**Anexo 10**) (5,6).

Las alteraciones en el clima anteriormente mencionadas dan paso al retroceso glaciar, hecho que se ha observado que ocurre en los glaciares de la Cordillera Blanca que alimentan ríos y lagunas de las subcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Santa (**Anexo 4**) (8). Una de las subcuencas más afectadas es la subcuenca de Quillcay, donde se produjo una pérdida del 43% de su superficie glaciar en el periodo de 1930-2016 (**Anexo 3**) (8). Esta pérdida de área glaciar, a través de la erosión y lixiviación de las rocas ricas en sulfuros expuestas al agua y al oxígeno atmosférico, conduce a la generación del drenaje ácido de rocas (DAR) (11). El pH ácido generado por el DAR posibilita la presencia de metales disueltos, entre los que se pueden destacar metales pesados altamente tóxicos para la salud de los humanos, como arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb) (11, 12). La presencia de estos metales es atribuible exclusivamente al drenaje ácido de rocas ya que no existe actividad minera en la zona (9).

El DAR ha sido reportado en las microcuencas de Shallap y Quilcayhuanca, y varios estudios indican la presencia de los metales pesados ya mencionados (13, 14, 15). Es importante señalar que existe un canal de regadío llamado Shallap-Huapish-Toclla que se abastece del río Shallap, cuerpo de agua afectado en gran medida por el DAR (**Anexo 9**) (9, 17, 19). En base a esto, se generó una iniciativa de biorremediación que buscaba disminuir los impactos negativos en la calidad del agua (i.e. mantener concentraciones bajas de metales pesados y pH adecuado) de dicho canal a través de la construcción de dos humedales superficiales (19). Sin embargo, hasta donde se sabe, no se publicaron los resultados de biorremediación ni la efectividad de los humedales en la disminución de la presencia de metales pesados tras la aplicación de esta medida.

Hasta el año 2016, se contabilizaron 3040 familias que utilizan el agua de este canal de regadío y se sabe que es utilizado principalmente para la agricultura y ganadería de autoconsumo, lo cual podría ser riesgoso debido a la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua que lo abastecen (18, 20, 21). Esto podría estar desencadenando una exposición ocupacional en los agricultores de la zona y una exposición no ocupacional a través del consumo de vegetales que acumulan metales pesados por estar cultivados en suelos que concentran estos contaminantes provenientes del agua del canal Shallap-Huapish-Toclla (18). Además, se sabe que las familias de esta zona cuentan con distintos factores de riesgo tales como su residencia en un ecosistema vulnerable, distintos grupos etarios como niños y adultos mayores, su alta dependencia a actividades agrícolas, el acceso limitado a recursos hídricos y una infraestructura pública de salud deficiente, lo cual incrementa su susceptibilidad a ser afectados por la presencia de metales pesados (21, 36).

Si bien la presencia de As, Cd y Pb provenientes del DAR ha sido reportada en la subcuenca de Quillcay, sobre todo en la laguna y río Shallap, no existen estudios que aborden los potenciales efectos de la exposición a estos metales pesados en la salud de las comunidades que utilizan como recurso hidrológico los cuerpos de agua de las microcuencas afectadas por el DAR.

Es por ello que, tomando en cuenta que el uso del canal Shallap-Huapish-Toclla podría constituir una vía de exposición a metales pesados para los pobladores asentados en la subcuenca de Quillcay, el presente proyecto plantea determinar los potenciales efectos en la salud de las comunidades situadas en esta subcuenca (variable efecto) que puedan estar relacionados a la exposición a metales pesados (As, Cd, Pb) generados por el drenaje ácido de rocas tras el retroceso glaciar (variable causa).

Para ello, los potenciales efectos sobre la salud se evaluarán obteniendo datos de concentraciones de un determinado metal pesado a través de la extracción de muestras biológicas: sangre para plomo (Pb) y orina para arsénico (As) y cadmio (Cd). También se realizará una inspección dermatológica para la evaluación de exposición a arsénico (As). El seguimiento de la población se hará durante dos años consecutivos y la obtención de muestras biológicas cada 3 meses.

La exposición ambiental se evaluará realizando mediciones de las concentraciones de metales pesados y del pH del agua en distintos puntos de muestreo a lo largo del trayecto del canal Shallap-Huapish-Toclla, del río Shallap y de las fuentes de agua de consumo referidas por la población en una encuesta sociodemográfica. Este monitoreo se realizará también cada 3 meses en el mismo periodo de dos años.

La encuesta sociodemográfica anteriormente mencionada abordará variables relevantes (**Anexo 18**) para reconocer la vía de exposición a metales pesados y determinar los factores de riesgo que podrían agravar los potenciales efectos en la salud de las personas que utilizan este canal. Asimismo, para evaluar el rol de los vegetales como posible vía de exposición a metales pesados, se determinarán los factores de bioconcentración y consumo diario estimado de metales considerando los principales cultivos de cada familia evaluada.

Los impactos en la salud de los metales pesados han sido ampliamente documentados en la literatura científica; sin embargo, esta propuesta describiría por primera vez los potenciales efectos en la salud de una exposición a metales pesados cuyo origen corresponde a una fuente natural de contaminación: el drenaje ácido de rocas. Además, sería el primer estudio en detallar y asociar la exposición a DAR con efectos en la salud humana. Adicionalmente, sería un estudio clave en cuanto a la comprensión de los impactos en la salud humana por parte del cambio climático, ya que sería uno de los primeros en establecer una relación directa entre dicha emergencia climática y la salud.

La información que se podría obtener de la presente investigación sería útil para la elaboración de políticas públicas relacionadas a la salud. Asimismo, permitiría que los tomadores de decisiones puedan considerar al drenaje ácido de rocas como un efecto negativo del cambio climático que trae consecuencias en el estilo de vida de las comunidades andinas, principalmente en su salud y actividades socioeconómicas. Esto ayudaría a la elaboración de planes de mitigación y adaptación frente a la exposición de las comunidades a esta problemática de índole socioambiental.

ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la subcuenca de Quillcay, específicamente al sector correspondiente al bloque de riego del canal Shallap-Huapish-Toclla (**Anexo 9**). Se estima que aproximadamente 3040 familias utilizan el canal principalmente para actividades de agricultura y ganadería con fines de autoconsumo (**Anexo 11**). Por lo cual, se les contactará con el fin de conversar sobre la participación de cada integrante de la familia en el proyecto y contar con sus respectivos consentimientos informados. En el caso de menores de edad, se conversará con los padres o apoderados de los mismos. Asimismo, al requerir muestras de sangre, se tomará en cuenta que las personas enroladas en el estudio no presenten anemia.

Monitoreo de la concentración de metales pesados en muestras biológicas

El presente proyecto propone un estudio de tipo cohorte longitudinal, es decir, que realiza un seguimiento de la población expuesta (personas que refieran el uso directo del canal, por ejemplo, para actividades agrícolas o ganaderas) y no expuestas a través de distintas mediciones en el tiempo para observar cómo varían las concentraciones de metales pesados según la muestra biológica: en sangre para la evaluación de exposición a plomo (Pb) y en orina para la evaluación de arsénico (As) y cadmio (Cd) (**Anexo 16**). Además, para la evaluación de arsénico, también se aplicarán inspecciones dermatológicas.

El seguimiento de esta población se realizará por dos años consecutivos y la obtención de las muestras biológicas se dará cada 3 meses. Frente a dos mediciones sucesivas, respetando el intervalo de 3 meses entre cada medición, que detecten una concentración de metales pesados mayor al límite de acuerdo a la muestra biológica extraída (**Anexo 16**), se le informará al

individuo y se procederá a hacerle una evaluación de salud exhaustiva para determinar si hay impacto en el órgano diana del metal o metales para el cual presenta niveles altos (**Anexo 19**).

Encuestas sociodemográficas

Junto con la obtención de muestras biológicas, cada 3 meses, se recolectará la información sobre el estilo de vida de los participantes del estudio a través de encuestas sociodemográficas que incluyan variables que son relevantes en cuanto a la exposición ambiental a As, Cd y Pb. Cabe destacar que dichas variables ayudan a interpretar los resultados de las concentraciones de metales debido a que los impactos en la salud por exposición a metales pesados pueden diferir de acuerdo a factores de riesgo como la edad, la ocupación, el sexo, entre otras. Las variables que serán consideradas en la encuesta sociodemográfica son edad, sexo, lugar de nacimiento, tiempo de residencia, ocupación, uso de pesticidas, acceso a agua, saneamiento, fuente de abastecimiento hídrico, etnicidad y acceso a servicios básicos como electricidad, agua y desagüe (**Anexo 18**).

Con respecto a la edad, es considerada debido a que los niños presentan mayor frecuencia de anemia ferropénica y deficiencias nutricionales, condiciones que incrementan la cantidad de cadmio absorbido, por lo que se les considera como una población de riesgo ante la exposición a este metal (24, 25). De igual manera, el sexo es considerado ya que las mujeres en edad fértil también presentan mayor frecuencia de anemia ferropénica y deficiencias nutricionales. Por lo anteriormente expuesto, también son consideradas como una población de riesgo ante la exposición a este metal (24, 25).

Las variables lugar de nacimiento y tiempo de residencia son abordadas para descartar que, ante la presencia de metales pesados en las muestras biológicas de la persona encuestada, se trate de una exposición ambiental que provenga de alguna otro lugar que se vea afectado por

metales pesados a través del desarrollo de prácticas mineras. De igual manera, el uso de pesticidas es considerado para descartar que, ante una detección fuera de los límites de metales pesados en muestras biológicas, esta variable esté involucrada en la exposición a metales pesados.

Una de las variables clave para el estudio es la ocupación debido a que provee más detalles en relación a la frecuencia de contacto que se tiene con el canal Shallap-Huapish-Toclla, por lo cual esta variable sirve para evaluar si existe una relación entre la frecuencia del uso del agua del canal Shallap-Huapish-Toclla con, en caso de encontrarse, una mayor concentración de metales pesados en las muestras biológicas de personas que se dediquen a la agricultura o a la ganadería.

Monitoreo de la calidad ambiental del agua del río Shallap, del canal Shallap-Huapish-Toclla, de las principales fuentes de agua de consumo y de las plantas o vegetales de autoconsumo

En cuanto al monitoreo ambiental de metales pesados, el proyecto propone un estudio de la calidad del agua del río Shallap en 8 puntos de muestreo equidistantes, partiendo por un punto del río cerca a la bocatoma del canal (**Anexo 20**). Para determinar la calidad del agua, los parámetros a analizar son concentración de metales pesados (As, Cd y Pb) y pH. De manera semejante, se analizará la calidad de agua presente en el canal Shallap Huapish Toclla en 8 puntos de muestreo situados a lo largo de su trayecto (**Anexo 20**).

Tras la consulta en la encuesta sociodemográfica acerca de la principal fuente de agua de consumo –el agua que beben–, se tomará una muestra de la fuente referida (sea dentro de la vivienda o en algún cuerpo hidrológico cercano) con el fin de estimar los parámetros de calidad

del agua (i.e. presencia de metales pesados y pH). Esto se realiza para descartar una exposición a metales pesados por esta vía y conocer si existe alguna otra fuente de recursos hídricos que pueda explicar una posible exposición a metales pesados.

Por otro lado, para evaluar el rol de los vegetales y el suelo como posibles vías de exposición a metales pesados, se determinarán los factores de bioconcentración (BCF) de los principales cultivos que consume cada familia evaluada a través de la medición de la concentración de metales en las raíces de la planta o vegetal y en el suelo (**Anexo 13**). Además, el valor del consumo diario estimado de metales (EDIM) se calculará para evaluar la ingesta de metales pesados a través de las plantas consumidas (**Anexo 14**).

Por último, al no haber suficiente información disponible sobre la exposición ambiental a metales pesados liberados de forma natural a través del consumo de animales que atraviesan un proceso de bioacumulación, el proyecto no realizará toma de muestras de los mismos por cuestiones de ética.

REFERENCIAS

1. Veettil B, Kamp U. Global Disappearance of Tropical Mountain Glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences*. 2019;9(5): 2, 3.
2. Cook S, Swift D, Kirkbride M, Knight P, Waller R. The empirical basis for modelling glacial erosion rates. *Nature Communications*. 2020;11(1).
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Volume 1, Global and Sectoral Aspects*. Cambridge: Cambridge University Press; 2015. p. 4, 44, 144
4. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press; 2007. p. 5,
5. Milner A, Khamis K, Battin T, Brittain J, Barrand N, Füreder L et al. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017;114(37): 9771, 9974, 9775.
6. Schauwecker S, Rohrer M, Acuña D, Cochachin A, Dávila L, Frey H et al. Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*. 2014;119: 3.
7. The Lancet Countdown on Health and Climate Change. Policy brief for Peru. *The Lancet*. 2021; p. 4.
8. Seehaus T, Malz P, Sommer C, Lippl S, Cochachin A, Braun M. Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*. 2019;13(10):2538.
9. Martel Valverde G, C. Torres Lázaro J, Jara Infantes W. Variación del pH en Aguas Superficiales Debido a Drenajes Ácidos de Roca en la Subcuenca Quillcay, Huaraz, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. 2018;(5):58, 67.

10. Burns P, Nolin A. Using atmospherically-corrected landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*. 2014;140:165, 175.
11. Grande J, Loayza-Muro R, Alonso-Chaves F, Fortes J, Willems B, Sarmiento A et al. The Negro River (Ancash-Peru): A unique case of water pollution, three environmental scenarios and an unresolved issue. *Science of The Total Environment*. 2019;648:400.
12. Zarroca M, Roqué C, Linares R, Salminci J, Gutiérrez F. Natural acid rock drainage in alpine catchments: A side effect of climate warming. *Science of The Total Environment*. 2021;778: 2.
13. Montano Y, Fuentealba B, Tapia P. M. & Mallqui H. Reporte: Calidad de agua de la Unidad Hidrográfica (UH) Río Blanco-Santa Cruz. 2021. Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) - INAIGEM.
14. Loayza-Muro R, Marticorena-Ruiz J, Palomino E, Merritt C, De Baat M, Gemert M et al. Persistence of Chironomids in Metal Polluted Andean High Altitude Streams: Does Melanin Play a Role?. *Environmental Science & Technology*. 2012;47(1):601-607.
15. Loayza-Muro R, Duivenvoorden J, Kraak M, Admiraal W. Metal leaching, acidity, and altitude confine benthic macroinvertebrate community composition in Andean streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2013;33(2):404-411.
16. Fortner S, Mark B, McKenzie J, Bury J, Trierweiler A, Baraer M et al. Elevated stream trace and minor element concentrations in the foreland of receding tropical glaciers. *Applied Geochemistry*. 2011;26(11):1800.
17. Loayza Muro R. Calidad De Agua En Cabeceras De Cuencas Altoandinas En El Contexto De Cambio Climático. Huaraz; 2014. p. 9.
18. ÁNCASH : DESARROLLO AGRÍCOLA EN MARCHA | RESULTADOS 2011 - 2016. Ministerio de Agricultura y Riego. 2016. p. 8.

19. Zimmer A, Brito Rodríguez M, Alegre Oropeza C, Sánchez León J, Recharte Bullard J. Implementación de Dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. 2018;(4): 61.
20. Menacho Julca K. *Mujer Andina Y Cambio Climático En La Cordillera Blanca* [Tesis]. Pontificia Universidad Católica del Perú; 2018. p. 13.
21. Zimmer A. Diagnóstico de la subcuenca Quillcay. USAID e Instituto de Montaña. 2016. p. 21, 22.
22. Ali H, Khan E. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs—Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2018;25(6):6.
23. Orellana E, Bastos M, Cuadrado W, Zárate R, Sarapura V, Yallico L et al. Heavy Metals in Native Potato and Health Risk Assessment in Highland Andean Zones of Junin, Peru. *Journal of Environmental Protection*. 2020;11(11):921-937.
24. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda K. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014;7(2):66-69.
25. Wani A, Ara A, Usmani J. Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*. 2015;8(2):55.
26. Rehman K, Fatima F, Waheed I, Akash M. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2017;119(1):157-184.
27. Arsénico [Internet]. Who.int. 2018 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
28. Ramírez A. Exposición ocupacional y ambiental al arsénico: actualización bibliográfica para investigación científica. *Anales de la Facultad de Medicina*. 2013; 74(3): 239-240.

29. Osores F. Diagnóstico de salud ambiental humana en la provincia de Espinar-Cusco. 2016. p. 10-17, 22-25.
30. Biomonitoring Arsenic: Facts and Figures - MN Data [Internet]. Data.web.health.state.mn.us. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: https://data.web.health.state.mn.us/biomonitoring_arsenic
31. Chen C, Hsu L, Wang C, Shih W, Hsu Y, Tseng M et al. Biomarkers of exposure, effect, and susceptibility of arsenic-induced health hazards in Taiwan. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005;206(2):198-206.
32. Exposure to cadmium: a major public health concern [Internet]. Who.int. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf>
33. Nordberg G, Nogawa K, Nordberg M. Cadmium. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 2015; 667, 680.
34. Glossary of metals [Internet]. Cdc.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.cdc.gov/nceh/clusters/fallon/Glossary-Metals.pdf>
35. Ramírez A. El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo. *Anales de la Facultad de Medicina*. 2005; 66(1): 59-61.
36. Jakubowski M. Low-level environmental lead exposure and intellectual impairment in children — The current concepts of risk assessment. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2011;24(1):3-5.
37. Blood Lead Reference Value [Internet]. Cdc.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.cdc.gov/nceh/lead/data/blood-lead-reference-value.htm>
38. Ministerio de Salud del Perú. Plan nacional para la reducción y control de la anemia materno infantil y la desnutrición crónica infantil en el Perú: 2017 - 2021. Lima; 2017 p. 9, 17.

39. Milton A, Hussain S, Akter S, Rahman M, Mouly T, Mitchell K. A Review of the Effects of Chronic Arsenic Exposure on Adverse Pregnancy Outcomes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(6): 1,3.
40. Fano, D., Vásquez-Velásquez, C., Aguilar, J. et al. Arsenic Concentrations in Household Drinking Water: A Cross-Sectional Survey of Pregnant Women in Tacna, Peru, 2019. *Expo Health* 12; 2020: 555–560.
41. Almerud P, Zamaratskaia G, Lindroos A, Bjermo H, Andersson E, Lundh T et al. Cadmium, total mercury, and lead in blood and associations with diet, sociodemographic factors, and smoking in Swedish adolescents. *Environmental Research*. 2021;197: 4.
42. Ministerio de Cultura del Perú. Las comunidades campesinas en la región Áncash. s.f. p. 4-6

ANEXOS

Anexo 1: Ubicación de la Cordillera Blanca



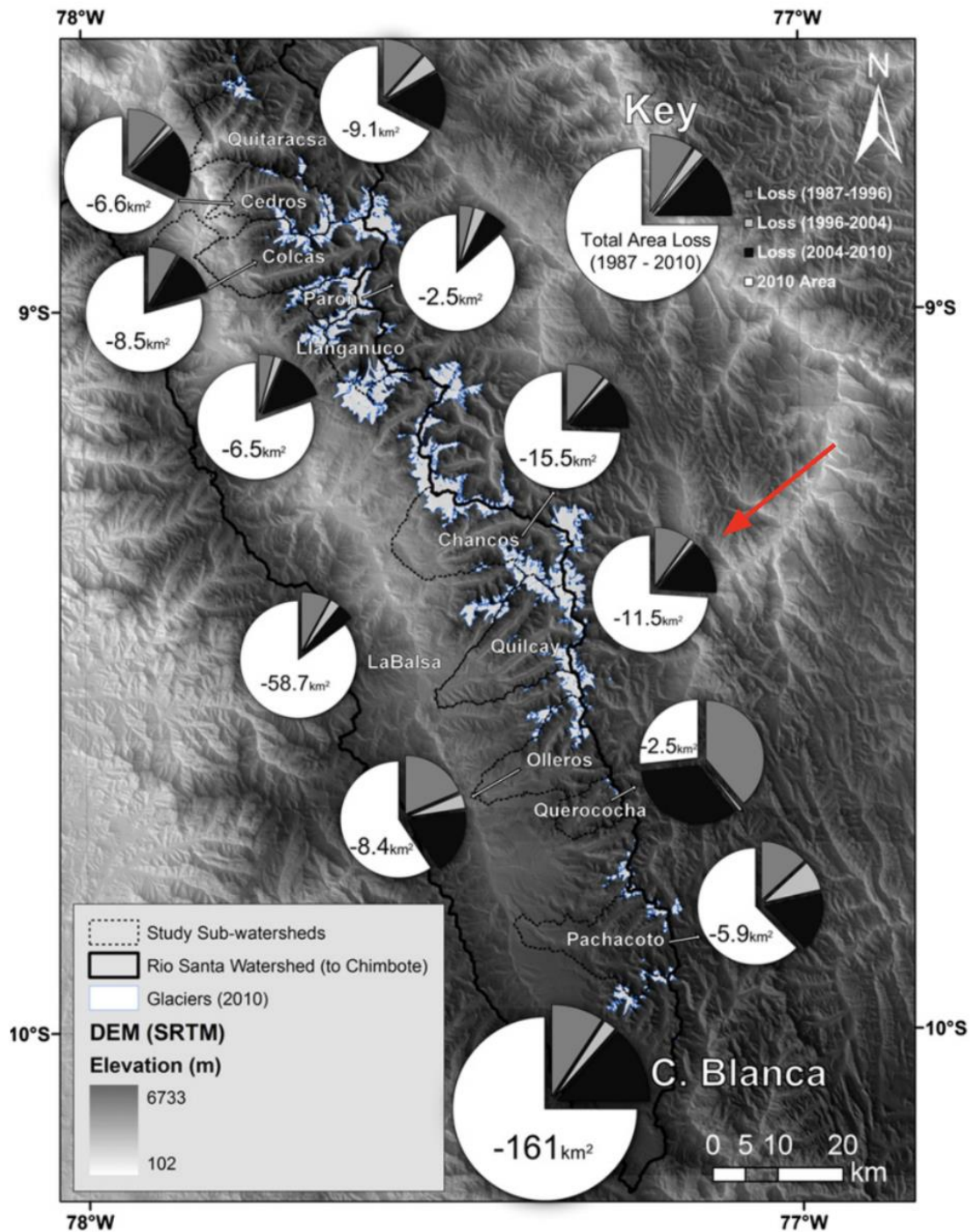
Adaptado de Figura 1: Sevillano C. Breve Historia de la Ornitología en los Altos Andes del Norte del Perú y Su Importancia para la Conservación Brief History of Ornithology in the High Andes of Northern Peru and Its Importance for Conservation. 2017.

Anexo 2: Cuerpos hidrológicos correspondientes a la subcuenca de Quillcay



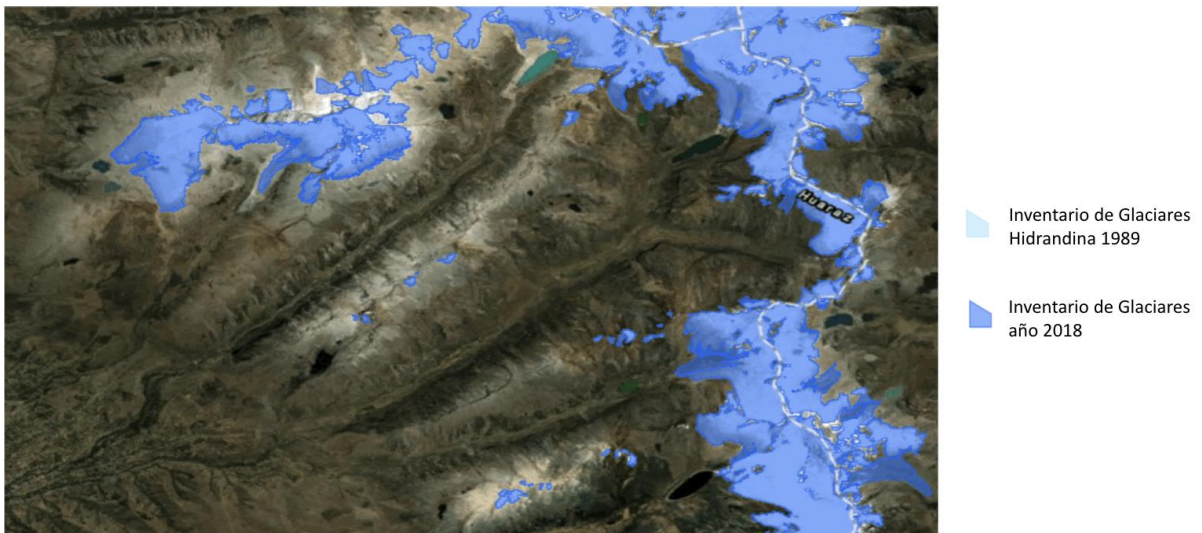
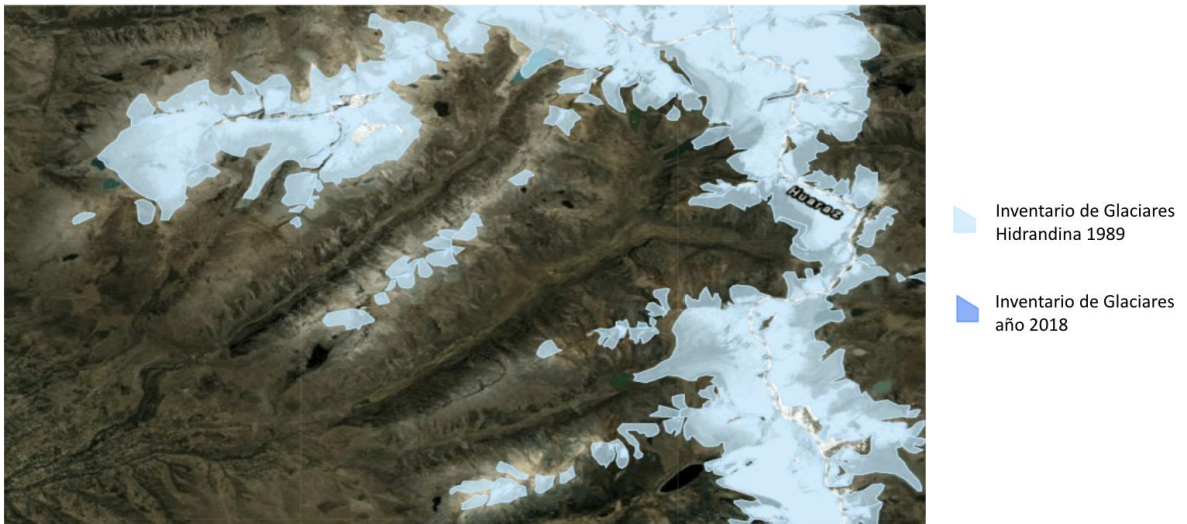
Adaptado de Mapa 2: Zimmer A. Diagnóstico de la subcuenca Quillcay. USAID e Instituto de Montaña. 2016.

Anexo 3: Retroceso glaciar en la Cordillera Blanca



Adaptado de Figura 9: Burns P, Nolin A. Using atmospherically-corrected landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. Remote Sensing of Environment. 2014;140.

Anexo 4: Retroceso glaciar en la subcuenca de Quillcay (1989-2018)



Subcuenca de Quillcay

Fuente: Story Map Swipe and Spyglass [Internet]. Inaigem.maps.arcgis.com. 2021 [cited 04 December 2021]. Available from:
<https://inaigem.maps.arcgis.com/apps/StorytellingSwipe/index.html?appid=fdb720b1e2c542ae933f872a2babd63e>

Anexo 5: Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA)

Categoría 1: Poblacional y Recreacional (mg/L) pg 4

	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Plomo (Pb)
A1 (Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección)	0.01	0.003	0.01
A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional)	0.01	0.005	0.05
A3 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado)	0.15	0.01	0.05
B1 (contacto primario)	0.01	0.01	0.01
B2 (contacto secundario)	-	-	-

A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

B: Aguas superficiales destinadas para recreación

Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales (pg 7)

(mg/L)

	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Plomo (Pb)
C1 (Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras)	0.05	0.01	0.0081

C2 (Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras)	0.05	0.01	0.0081
C3 (Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino costeras)	0.05	-	0.03
C4 (Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas)	0.1	0.01	0.0025

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales (mg/L)

	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Plomo (Pb)
D1 (Riego de vegetales: Agua para riego no restringido, agua para riego restringido)	0.1	0.01	0.05
D2 (Bebida de animales)	0.2	0.05	0.05

Fuente: Ministerio del Ambiente (MINAM). DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM.

El Peruano; 2017.

Anexo 6: Estándares de calidad de agua potable (mg/L)

	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Plomo (Pb)
Límite de concentración permitida	0.01	0.003	0.01

Fuente: Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable [Internet].

Who.int. 2006 [cited 4 December 2021]. Available from:

https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

Anexo 7: Estándares de Calidad Ambiental del Suelo Agrícola (ECA) (mg/kg)

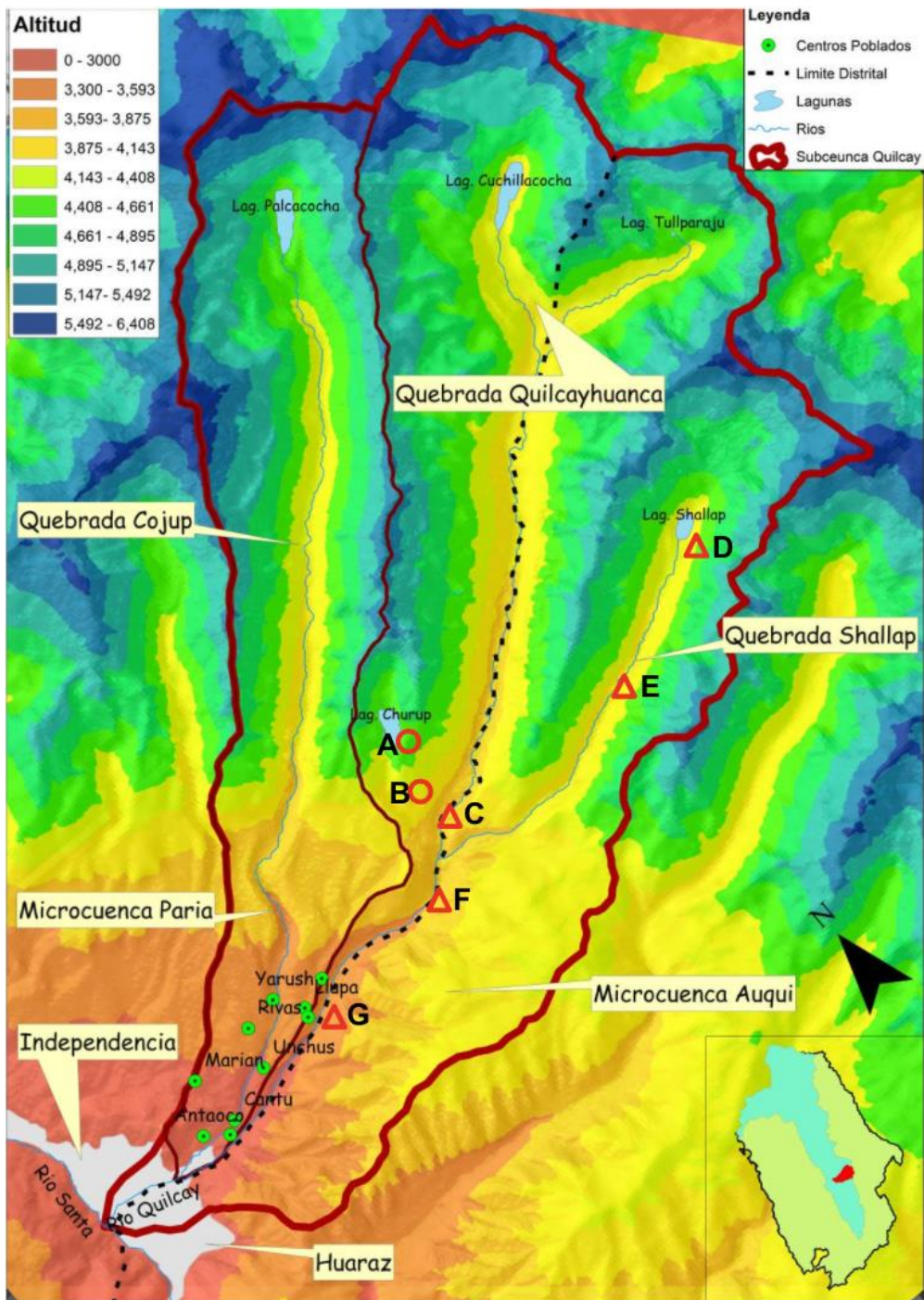
Suelo agrícola: Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas

	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Plomo (Pb)
Límite de concentración permitida	50	1.4	70

Fuente: Ministerio del Ambiente (MINAM). DECRETO SUPREMO N° 011-2017-MINAM.

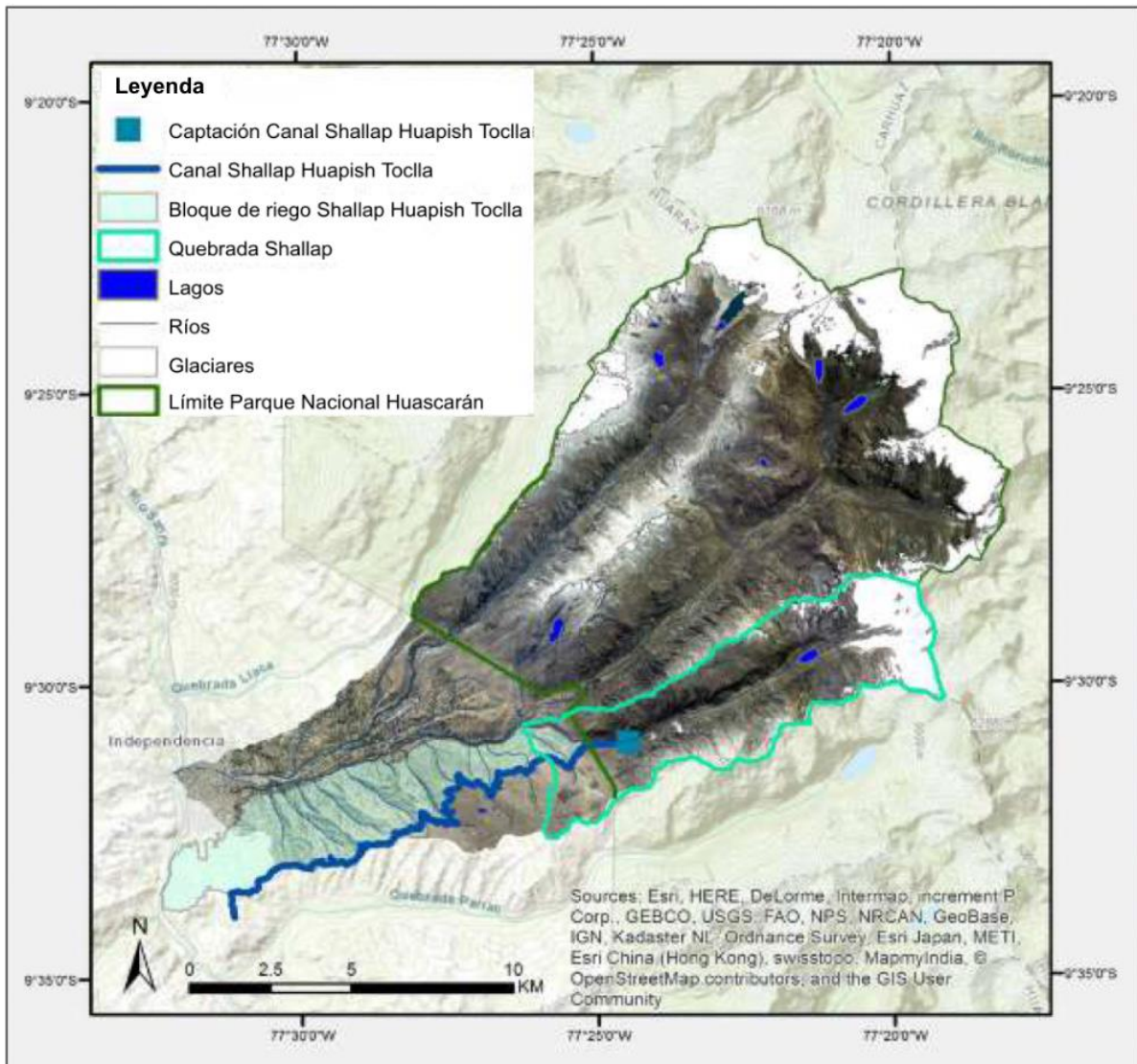
El Peruano; 2017.

Anexo 8: Esquema de calidad de agua en la subcuenca de Quillcay



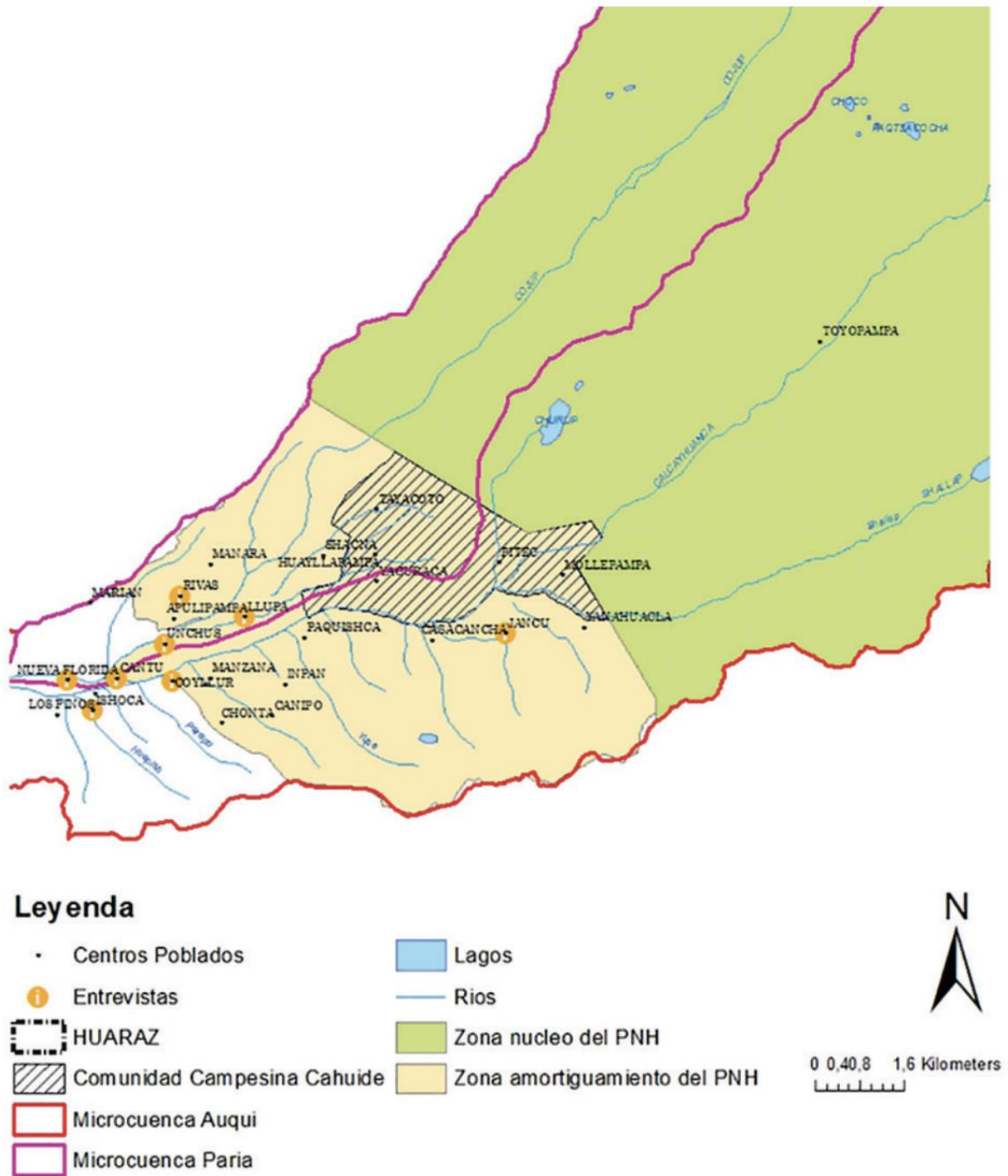
Fuente: Zimmer A. Diagnóstico de la subcuenca Quillcay. USAID e Instituto de Montaña. 2016.

Anexo 9: Bloque de riego correspondiente al canal Shallap-Huapish-Toclla



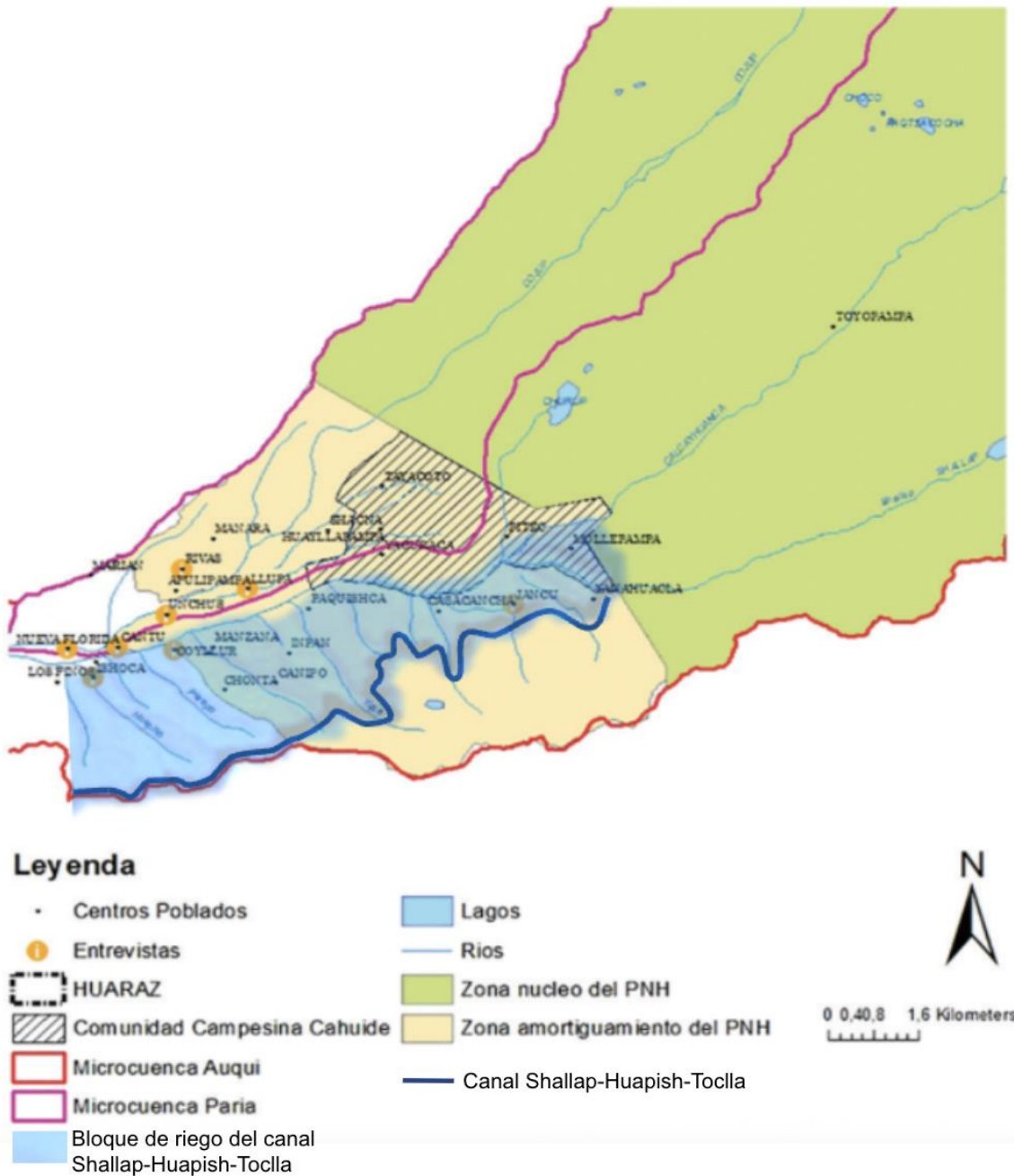
Adaptado de Figura 6: Zimmer A, Brito Rodríguez M, Alegre Oropeza C, Sánchez León J, Recharte Bullard J. Implementación de Dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. 2018;(4): 61.

Anexo 10: Centros poblados localizados en la subcuenca de Quillcay



Fuente: Zimmer A. Diagnóstico de la subcuenca Quillcay. USAID e Instituto de Montaña. 2016.

Anexo 11: Superposición del bloque de riego del canal Shallap-Huapish-Toclla con respecto a los centros poblados de la subcuenca de Quillcay



Adaptado de Mapa 1: Zimmer A. Diagnóstico de la subcuenca Quillcay. USAID e Instituto de Montaña. 2016.

Anexo 12: Precipitación de metales observada en el trayecto que recorre el agua del canal Shallap-Huapish-Toclla



Fuente: Raúl Augusto Loayza-Muro.

Anexo 13: Fórmula de Factor de Bioconcentración

$$BCF = \frac{C \text{ papa}}{C \text{ suelo}}$$

Donde *C* es la concentración de metales pesados por papa o muestra de suelo respectivamente, expresada en mg/kg. Si el valor del BCF es mayor a 1, quiere decir que la planta posee la capacidad de bioacumular metales pesados en su biomasa.

Fuente: Orellana E, Bastos M, Cuadrado W, Zárate R, Sarapura V, Yallico L et al. Heavy Metals in Native Potato and Health Risk Assessment in Highland Andean Zones of Junin, Peru. *Journal of Environmental Protection*. 2020;11(11):921-937.

Anexo 14: Fórmula de Consumo Diario Estimado de Metales

$$EDIM = \frac{Cm \times Cf \times IR}{BW}$$

Las unidades del EDIM son mg/kg/día, donde Cm es la concentración del metal en el tubérculo (medida en en mg/kg), Cf es el factor de conversión del peso fresco al peso seco de los vegetales (cuyo valor es 0.085), IR es la tasa de ingesta diaria de la papa (expresada en kg/día/persona) y BW es el peso corporal promedio (kg).

Fuente: Orellana E, Bastos M, Cuadrado W, Zárate R, Sarapura V, Yallico L et al. Heavy Metals in Native Potato and Health Risk Assessment in Highland Andean Zones of Junin, Peru. Journal of Environmental Protection. 2020;11(11):921-937.

Anexo 15: Tabla de vías de exposición a metales pesados

Fuentes de Exposición	Vía mediante la cual ingresa el metal al organismo
Suelo/Sedimento	Ingesta accidental de partículas
	Absorción tras adhesión dérmica de suelo contaminado
	Inhalación de partículas suspendidas
Agua superficial	Ingesta accidental durante uso recreacional
	Ingesta por ser fuente de consumo
	Contacto dérmico a la piel
Alimentos	Ingesta de vegetales que hayan crecido en suelos contaminados
	Ingesta de animales de la zona que se hayan expuesto a los metales a través del suelo, vegetación, sedimento o aguas superficiales

Fuentes:

- Orellana E, Bastos M, Cuadrado W, Zárate R, Sarapura V, Yallico L et al. Heavy Metals in Native Potato and Health Risk Assessment in Highland Andean Zones of Junin, Peru. Journal of Environmental Protection. 2020;11(11):921-937.

- Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda K. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014;7(2):66-69.
- Wani A, Ara A, Usmani J. Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*. 2015;8(2):55.
- Rehman K, Fatima F, Waheed I, Akash M. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2017;119(1):157-184.
- Jakubowski M. Low-level environmental lead exposure and intellectual impairment in children — The current concepts of risk assessment. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2011;24(1):3-5.

**Anexo 16: Tabla de valores máximos permitidos en muestras biológicas de
concentración de metales pesados**

Muestra biológica	Límite de concentración del metal pesado		
	Arsénico (As)	Cadmio (Cd)	Plomo (Pb)
Sangre	-*	5 µg/L	35 µg/L
Orina	50 µg/L	10 µg/L	-**

*El arsénico suele ser evaluado en muestras de orina, por lo que no se encuentra un límite estándar para su evaluación en sangre.

**El plomo suele ser evaluado en muestras de sangre, por lo que no se encuentra un límite estándar para su evaluación en orina.

Fuentes:

- Glossary of metals [Internet]. Cdc.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.cdc.gov/nceh/clusters/fallon/Glossary-Metals.pdf>
- Blood Lead Reference Value [Internet]. Cdc.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.cdc.gov/nceh/lead/data/blood-lead-reference-value.htm>
- Blood Lead Reference Value | Lead | CDC [Internet]. Cdc.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.cdc.gov/nceh/lead/data/blood-lead-reference-value.htm>

**Anexo 17: Ejemplo de resultado de encuesta sociodemográfica que relaciona variables
objetivas con concentración de metales pesados en muestras biológicas**

Characteristics	Description	iAs category ($\mu\text{g/L}$)			<i>p</i>
		≤ 10	25	> 25	
Participants	<i>N</i>	47	56	55	–
	%	29.75	35.44	34.81	–
Geographic zone	South	38	13	1	<0.001
	Metropolitan	7	31	19	
	North	2	12	35	
Age	Years old	28.97	28.93	26.68	0.97
Living in Tacna	Years	15.39	18.52	17.18	0.15
Gestational age	Weeks	15.1	16.15	15.75	0.64
Pre-gestational habits	Smoke	0	1	4	0.09
	Alcohol	1	5	8	0.09
Pre-gestational BMI	Mean (kg/m^2)	27.13	25.93	26.58	0.80
Categorized BMI ^a	Underweight	0	2	1	0.61
	Normal	18	23	17	
	Overweight	17	21	20	
	Obesity	12	10	17	
Basic services access (Electricity, water, sewer)	At least 1	9	1	1	<0.001
	At least 2	5	0	1	
	All	33	55	53	
Education	Elementary	2	4	4	0.77
	High School	29	31	27	
	Higher	16	21	24	
Marital status	Single	7	16	13	0.35
	Married or cohabiting	40	40	42	
Ethnicity ^a	Aymara	24	27	30	0.08
	Quechua	7	8	2	
	Mestizo	7	20	19	
Occupation	Housewife	28	33	29	0.63
	Worker	16	21	25	
	Student	3	2	1	

Fuente: Fano, D., Vásquez-Velásquez, C., Aguilar, J. et al. Arsenic Concentrations in Household Drinking Water: A Cross-Sectional Survey of Pregnant Women in Tacna, Peru, 2019. *Expo Health* 12; 2020: 555–560.

Anexo 18: Variables dependientes e independientes

Variables independientes		Variables dependientes
Concentración de arsénico en el canal Shallap-Huapish-Toclla		Concentración de arsénico en muestras biológicas (orina)
Concentración de arsénico en el río Shallap		
Concentración de cadmio en el canal Shallap-Huapish-Toclla		
Concentración de cadmio en el río Shallap		
Concentración de plomo en el canal Shallap-Huapish-Toclla		Concentración de cadmio en muestras biológicas (orina y sangre)
Concentración de plomo en el río Shallap		
Factores de riesgo	Edad	Concentración de plomo en muestras biológicas (sangre)
	Sexo	
	Lugar de nacimiento	
	Tiempo de residencia	
	Ocupación	Presencia de hiperpigmentación en la piel e hiperqueratosis palmoplantar
	Uso de pesticidas	
	Acceso a agua	
Fuente de abastecimiento hídrico		
Factor de Bioconcentración		
Consumo Diario Estimado de Metales		

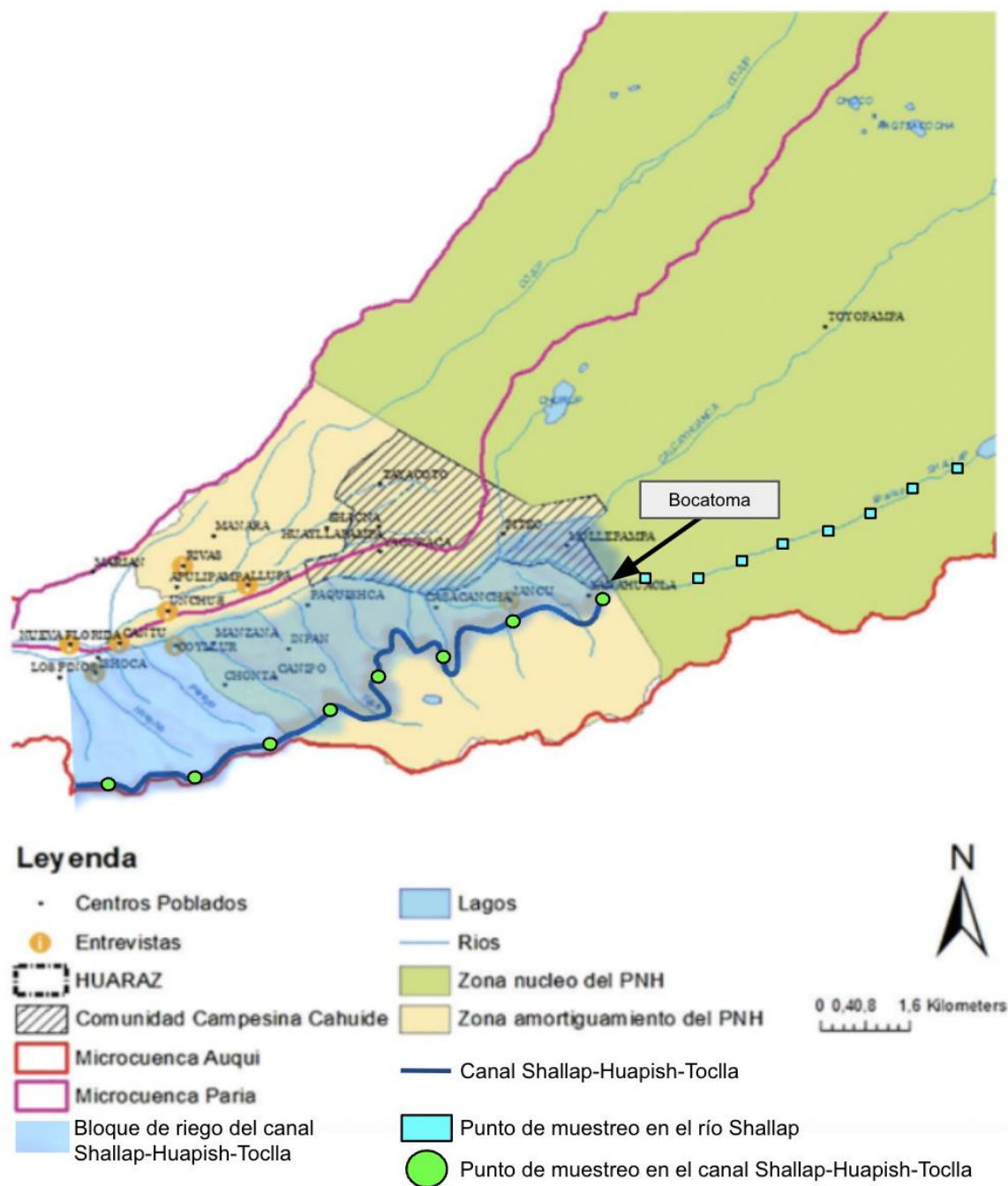
Anexo 19: Procedimientos médicos exhaustivos según metal pesado y órganos principalmente afectados

Metal pesado	Órgano más afectado	Procedimientos médicos de mayor profundidad
Arsénico (As)	Piel	Especiación de arsénico
Cadmio (Cd)	Riñón	Fluorescencia de rayos X
Plomo (Pb)	Tejido óseo	Densitometría ósea

Fuentes:

- Arsenic Toxicity: Clinical Assessment | Environmental Medicine | ATSDR [Internet]. Atsdr.cdc.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: https://www.atsdr.cdc.gov/csem/arsenic/clinical_assessment.html
- Faroon O, Ashizawa A, Wright S, Tucker P, Jenkins K, Ingerman L et al. ANALYTICAL METHODS [Internet]. Ncbi.nlm.nih.gov. 2021 [cited 4 December 2021]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158833/>
- Colorado Arredondo M. Estudio de la eficacia de la determinación del plomo en sangre como valor predictivo en el estudio de la pérdida de masa ósea [Tesis]. Universidad Complutense de Madrid; 2017.

Anexo 20: Puntos de muestreo propuestos en el río Shallap y canal Shallap-Huapish-Toclla



Adaptado de Mapa 1: Zimmer A. Diagnóstico de la subcuenca Quillcay. USAID e Instituto de Montaña. 2016.