

## EVALUACIÓN SOCIOAMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS QUÍMICOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA LAGUNA UMAYO, PUNO, PERÚ

Socio-environmental assessment of chemical element contamination in the sediments of lake Umayo, Puno, Peru

Dante SALAS-ÁVILA<sup>1</sup>, Fermín F. CHAIÑA-CHURA<sup>1</sup>, Germán BELIZARIO-QUISPE<sup>1</sup>, Edgar QUISPE-MAMANI<sup>1</sup>, Edgar V. HURTADO-CHÁVEZ<sup>1</sup>, Félix ROJAS-CHAHUARES<sup>1</sup>, Marián HERMOZA-GUTIERREZ<sup>1</sup> y Dante SALAS-MERCADO<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigación en Metalurgia, Materiales y Medio Ambiente; Universidad Nacional del Altiplano de Puno; Av. Sesquicentenario, Puno; 21000; Puno; Perú.

\*Autor para correspondencia: [dsalasm@unap.edu.pe](mailto:dsalasm@unap.edu.pe)

(Recibido: mayo 2025; aceptado: agosto 2025)

Palabras clave: composición elemental, análisis integrativo, ecosistema lacustre altoandino, ambiente, comunidad.

### RESUMEN

La contaminación de cuerpos de agua genera impactos ambientales y sociales significativos, afectando los ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades locales. Este estudio evaluó el comportamiento social de los pobladores y la contaminación en los sedimentos de una laguna altoandina expuesta a fuentes antrópicas. A través de entrevistas, se identificaron cambios en el uso del agua y en las actividades productivas debido a la contaminación. Posteriormente, se midieron las concentraciones totales de metales pesados y fósforo en sedimentos superficiales, recolectados en los afluentes (ríos Vilque, Ccaccapunco, Challamayo) y el efluente (río Llungo) de la laguna Umayo. Los resultados indicaron que los pobladores han reducido el uso del agua para consumo y actividades agrícolas debido a su mala calidad. Además, la mortandad de vicuñas y ovejas ha aumentado la percepción de riesgo ambiental. Los análisis geoquímicos revelaron concentraciones elevadas de cadmio (Cd) y fósforo (P), que superaron los estándares de calidad en zonas agrícolas y de producción quesera. Asimismo, el mercurio (Hg) mostró un patrón de transporte desde el río Vilque hacia el centro del sistema acuático. El índice geoquímico confirmó contaminación moderada a fuerte por Cd, Cu y As. Por tanto, las actividades humanas han elevado los niveles de Cd, P, Hg y As en los sedimentos, impactando el ecosistema y forzando cambios en las prácticas comunitarias, en un contexto de limitada respuesta institucional frente a los conflictos ambientales.

Key words: elemental composition, integrative analysis, high-andean lacustrine ecosystem, environment, community.

### ABSTRACT

Water pollution generates significant environmental and social impacts, affecting ecosystems and the quality of life of local communities. This study assessed both the social behavior of residents and the contamination of sediments in a high Andean lake (Lake Umayo) exposed to anthropogenic sources. Through interviews, changes in water

usage and productive activities due to pollution were identified. Subsequently, total concentrations of heavy metals and phosphorus were measured in surface sediments collected from the lake's main body, its inflows (Vilque, Ccaccapunco, Challamayo Rivers), and outflow (Llungo River). The results indicated that residents have reduced water use for consumption and agricultural purposes due to its poor quality. Additionally, increased mortality of vicuñas and sheep has heightened concern regarding environmental impacts. Geochemical analyses revealed elevated concentrations of cadmium (Cd) and phosphorus (P), exceeding quality standards in agricultural and cheese-producing zones. Furthermore, mercury (Hg) displayed a transport pattern from the Vilque River toward the central aquatic system. The geochemical index indicated moderate to strong contamination by Cd, Cu, and As. Thus, human activities have increased levels of Cd, P, Hg, and As in sediments, affecting the ecosystem and prompting changes in community practices in a context of limited institutional response to environmental concerns.

---

## INTRODUCCIÓN

La gestión y conservación de los recursos hídricos representan desafíos globales de gran relevancia debido a su papel esencial en el equilibrio ecológico y el bienestar humano (Iwasa et al. 2007, Taipale et al. 2016). La evaluación de estos recursos se basa en parámetros como cantidad y calidad del agua, ambos influenciados por actividades antrópicas (Li et al. 2020). La contaminación acuática altera la composición química y biológica de los ecosistemas, afectando el transporte de sedimentos y la acumulación de sustancias nocivas (López et al. 2013).

Los sedimentos juegan un papel clave en el monitoreo de la contaminación, ya que pueden acumular elementos tóxicos provenientes tanto de procesos naturales como de actividades humanas. Diversas investigaciones han evidenciado la presencia de metales pesados en ríos y lagos, definiendo a los sedimentos como indicadores críticos de contaminación ambiental (Liu et al. 2016, Achi et al. 2021). Estos contaminantes pueden liberarse a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales, generando riesgos tanto ecológicos como para la salud humana (He et al. 2019).

La integración del conocimiento científico con la percepción comunitaria es fundamental para un monitoreo ambiental efectivo y la identificación de fuentes de contaminación (Quispe-Mamani 2021). En este sentido, la dimensión social hace referencia a la identificación comunitaria de las fuentes contaminantes, como a su participación en actividades de seguimiento ambiental y a la comunicación de los impactos observados, tal como se evidenció en el estudio de Ferreira-Rodríguez et al. (2021), quienes analizaron cómo la percepción local del riesgo impulsa demandas de intervención institucional en contextos afectados por mercurio. La percepción de

los pobladores respecto a los riesgos ambientales permite diseñar estrategias de monitoreo más efectivas y adaptar medidas de mitigación a las realidades locales (Hartig et al. 2020).

Casos como el del lago Tanganika han demostrado que una gestión inadecuada, carente de monitoreo participativo y la falta de articulación entre actores locales e institucionales, puede llevar a la degradación progresiva del ecosistema acuático (Phiri et al. 2023). Por ello, se reconoce que la participación social aporta no solo a la comprensión del problema, sino también a su prevención, control y remediación. Estudios en Perú destacan la importancia de integrar el conocimiento local en los programas de monitoreo para mejorar la gestión del agua y la formulación de políticas ambientales (Rangecroft et al. 2023).

En este contexto, la laguna Umayo, ubicada en la provincia de Puno, enfrenta problemas de contaminación por metales pesados. Las principales fuentes identificadas incluyen la minería artesanal de oro, la actividad agrícola intensiva y la producción artesanal de queso, que aportan contaminantes a través de relaves, fertilizantes y desechos orgánicos, lo que ha generado preocupación en la población local por posibles efectos sobre la salud del ganado ovino (Proactivo 2020). En respuesta a esta situación, los pobladores han presentado reclamos frente a la contaminación. A pesar de ello, las investigaciones sobre la calidad ambiental de la laguna son limitadas y han reportado resultados contradictorios (De la Cruz y Lazo 2020, Vilca 2022).

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento social de los pobladores frente a los efectos de la contaminación, y la contaminación por elementos químicos en los sedimentos de la laguna Umayo, con el fin de contribuir a la formulación de estrategias de gestión ambiental más efectivas, orientadas al control de fuentes

contaminantes y al diseño de medidas de mitigación contextualizadas, basadas en el análisis conjunto de información geoquímica y percepciones locales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

La laguna Umayo, situada en la región Puno, Perú, a 3844 msnm, se localiza al oeste del lago Titicaca y abarca aproximadamente un área de 35.38 km<sup>2</sup> (ANA 1979). Al carecer de un sistema de drenaje significativo, la evaporación es su principal mecanismo de pérdida de agua. En su interior se encuentra la isla Umayo, parte del Complejo Arqueológico de Sillustani, donde se preservan chullpas preincaicas, estructuras funerarias de la cultura Kolla (Sigé et al. 2004).

Geológicamente, la microcuenca de la laguna comprende formaciones que datan del Cretácico medio al Cuaternario neógeno, con predominancia del Grupo Barroso (GRP 2015). Su red hídrica incluye siete afluentes, de los cuales Challamayo, Ccaccapuncu y Vilque, son los más importantes debido a que ofrecen flujo constante (**Fig. 1**), y un efluente, el río Llungo, que conecta la laguna Umayo con el lago Titicaca (MINCETUR 2023).

La laguna alberga peces nativos como el carachi y el mauri, además de especies introducidas como pejerrey y trucha. También es hábitat de diversas aves acuáticas y su isla es una reserva de vicuñas (MINCETUR 2023). Las principales actividades económicas zona incluyen ganadería, con producción de leche y queso artesanal; agricultura de cultivos como papa, quinua y avena, y extracción de totora y llacho (*Elodea potamogeton*) para alimentación animal y construcción. La pesca artesanal de carachi y pejerrey es fundamental para la economía local, mientras que la minería, centrada en la explotación aurífera, involucra el uso de mercurio (CEDER 2015, Teran 2024).

### Comportamiento social de los pobladores

Para comprender el comportamiento social de los actores locales en relación con la contaminación de la laguna Umayo, los participantes proporcionaron su conocimiento sobre las causas y efectos percibidos de la contaminación. Se utilizó el enfoque metodológico cualitativo (Hernández-Sampieri y Mendoza 2018) que se centra en entender las experiencias, percepciones y significados de los participantes, utilizando la Teoría Fundamentada de Glaser y Strauss, que se basa en el análisis comparativo constante. Según Estrada-

Acuña et al. (2021), este proceso consiste en analizar y comparar los datos continuamente para identificar categorías y conceptos emergentes, construyendo así una relación coherente entre los datos y la teoría.

El muestreo fue no probabilístico, utilizando técnicas de bola de nieve y muestreo por conveniencia. La bola de nieve nos permitió identificar participantes iniciales que luego recomendaron a otros, mientras que el muestreo por conveniencia facilitó la inclusión de personas cercanas al área de estudio. Las comunidades entrevistadas se encuentran en la ribera de la laguna Umayo, en áreas rurales de los distritos colindantes a los afluentes, no habiéndose considerado la población residente en la isla, dado que esta forma parte de un área de conservación sin presencia permanente. Así, se seleccionaron 35 pobladores, entre ellos habitantes locales, productores, autoridades y líderes comunitarios (Valles 1999, Hernández-Sampieri y Mendoza 2018).

La recolección de datos se realizó mediante entrevistas semiestructuradas, que permitieron explorar en profundidad los pensamientos y emociones de los pobladores (Quispe-Mamani 2021), los cuales representan estados subjetivos y contrastantes que emergen en respuesta a distintos eventos o situaciones, incluyendo optimismo y pesimismo, entusiasmo y abatimiento, alegría y tristeza, así como ansiedad, miedo, ira y rechazo (Tang et al. 2016, Marteau 2017). También se llevó a cabo la técnica de grupo focal para captar las interacciones y percepciones compartidas entre los participantes y, por último, se realizó una revisión documental para obtener un contexto adicional sobre la contaminación de la laguna (Salas-Ávila et al. 2021). La información recolectada se procesó, utilizando el *software* Atlas.ti v8.4, el cual permitió organizar, codificar y categorizar la información. La codificación facilitó la identificación de patrones y la estructuración de los datos, permitiendo construir una teoría coherente que explicara las dinámicas sociales en torno a la contaminación de la laguna Umayo.

### Recolección y tratamiento de muestras

De acuerdo con lo indicado en el Protocolo Nacional de Monitoreo de Recursos Hídricos Superficiales del Perú (ANA 2016), se seleccionaron puntos de muestreo en cuatro afluentes (B, C, D, E) y en el efluente (A) de la laguna, ubicados a 50 metros antes de que los afluentes ingresen a la laguna y a 50 metros después de que el afluente salga de esta, respectivamente. Asimismo, se establecieron 12 estaciones dentro de la laguna, siguiendo el enfoque descrito por Wang et al. (2014), El-Amier et al.

(2017) y Salas-Mercado et al. (2023), que consiste en distribuir transectos paralelos con el fin de cubrir el área impactada del ecosistema acuático (**Fig. 1**). Para recolectar los sedimentos se empleó una draga tipo Ekman.

En cada una de las estaciones se recolectaron 250 gramos de sedimento superficial (profundidad de 0 a 5 cm), los cuales fueron tamizados con una malla de nylon de 230  $\mu\text{m}$ , almacenados en bolsas de polietileno y conservados a 4 °C hasta su análisis en laboratorio.

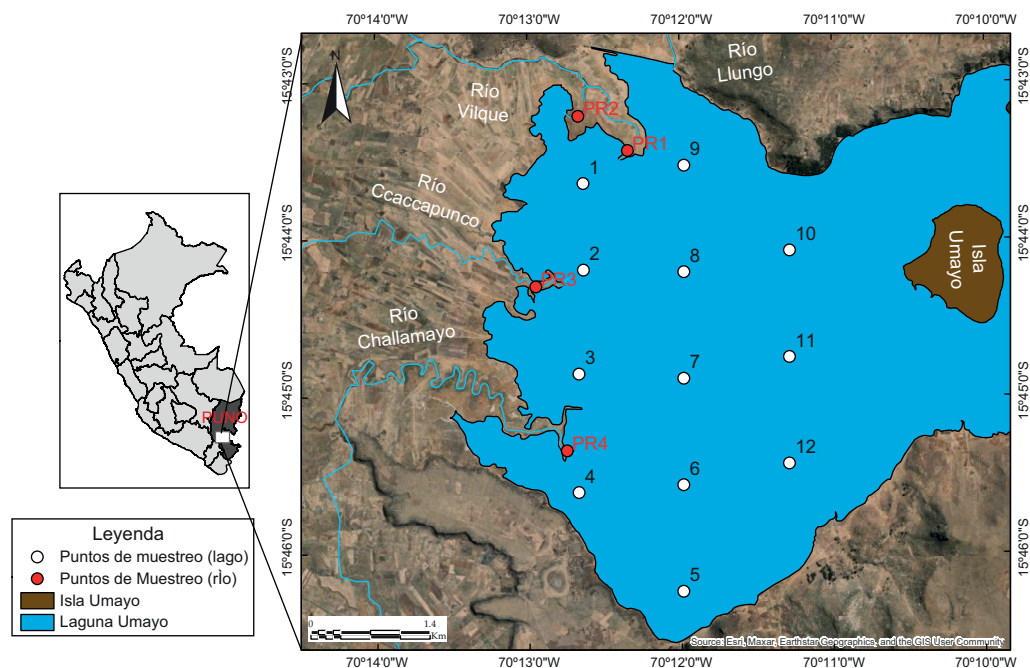
El análisis de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Cu, Hg, Pb) se realizó en el laboratorio acreditado ALS CorpLAB, utilizando una digestión con mezcla de  $\text{HNO}_3$  y HCL en proporción 1:3 v:v (agua regia) sobre 0.5 g de muestra seca. Las concentraciones se determinaron mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, modelo Agilent 5110), siguiendo los procedimientos EPA 3050B (USEPA 1996) y EPA 6010D (USEPA 2018). Para la cuantificación de mercurio, se utilizó el método de vapor frío descrito en el método EPA 7471B (USEPA 2007). Como parte del control de calidad, se incluyeron materiales de referencia certificados, además de blancos de campo y duplicados para garantizar la confiabilidad analítica. Además, se analizó el fósforo (P), con el fin de respaldar la posible relación entre el uso de fertilizantes

fosfatados y la presencia de Cd en los sedimentos, el P también fue cuantificado mediante ICP-OES, usando una curva de calibración independiente, tal como lo han demostrado diversos estudios (Yang et al. 2018, Szczepanska et al. 2027).

### Nivel de contaminación en agua y sedimentos por metales pesados

Utilizando las Directrices de Calidad de Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática de Canadá (CCME 1998), se evaluó la calidad de los sedimentos con elementos químicos como el As, Cd, Cu, Hg y Pb. Esta directriz clasifica la contaminación mediante dos límites: el límite de efectos probables (PEL) indicando que, si un elemento supera este nivel, presenta efectos negativos continuos en los ecosistemas acuáticos, y el límite de efecto umbral (ISQG), que representa efectos negativos eventuales. Aunque el fósforo no es un metal, se incluyó como indicador de contaminación antrópica debido a su relación con los procesos de eutrofización y su frecuente presencia en fertilizantes.

Además, se utilizó el índice de geo acumulación ( $I_{\text{geo}}$ ) para evaluar la contaminación por metales en sedimentos comparándolos con los valores base de acuerdo con el tipo de roca predominante en la zona de estudio (Turekian et al. 1961, GRP 2015), mediante la siguiente ecuación:



**Fig. 1.** Localización de los puntos de muestreo en los tributarios, afluentes y en el interior de la Laguna Umayo.

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[ \frac{C_{\text{metal}}^i}{1.5 \times C_{\text{base}}^i} \right]$$

Donde,  $C_{\text{metal}}^i$  es la concentración del elemento explorado,  $C_{\text{base}}^i$  es el valor de base del elemento explorado y 1.5 es el factor de corrección del valor base para la caracterización sedimentaria, petrológica y otras influencias.; Los resultados se clasificaron en las siguientes clases: Clase 0, no contaminado ( $I_{\text{geo}} < 0$ ); Clase 1, de no contaminado a moderadamente contaminado ( $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$ ); Clase 2, moderadamente contaminado ( $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$ ); Clase 3, de moderado a fuertemente contaminado ( $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$ ); Clase 4, fuertemente contaminado ( $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$ ); Clase 5, de fuertemente contaminado a extremadamente contaminado ( $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$ ); Clase 6, extremadamente contaminado ( $I_{\text{geo}} \geq 5$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento social de los pobladores

En el **cuadro I** se muestra la categoría “Sentimientos” que se subdivide en las siguientes subcategorías: “Enfermedades y mortandad de animales” y “Presencia de contaminación en el tiempo”. Con respecto a la primera, los pobladores muestran preocupación, ansiedad y miedo debido a los efectos que la contaminación en la laguna, particularmente la presencia de metales pesados podría tener en la salud de los animales (Iwasa et al. 2007). La mortalidad de vicuñas, ovejas y otros animales domésticos en la región es interpretada como una consecuencia de la contaminación del agua, que ellos perciben como contaminada con metales pesados (Tang et al. 2016). Este tipo de contaminación afecta tanto la fauna silvestre como a los animales domésticos, lo que agrava la sensación de incertidumbre y temor entre los habitantes, quienes dependen de los animales para su sustento económico. Además, varios testimonios refieren que este tipo de

episodios se repiten en épocas de lluvia, cuando se intensifica el transporte de sedimentos contaminados desde los afluentes hacia la laguna.

Por otro lado, con relación a la “Presencia de contaminación en el tiempo”, los pobladores identifican que esta problemática se manifiesta desde fines de los años 90, con una intensificación en los últimos cinco a diez años (Iwasa et al. 2007). Atribuyen este incremento al crecimiento de la minería artesanal y de las queserías, así como a la ausencia de fiscalización ambiental. Este testimonio revela un proceso histórico de expansión de actividades extractivas en ausencia de control estatal, lo que ha generado una percepción de abandono institucional frente a sus reclamos. Los actores locales señalan que la contaminación por metales pesados, como el mercurio proveniente de la minería, ha sido un factor crucial en la alteración del ecosistema acuático (Munguía y López 1999). La percepción de alteración se basa en cambios visibles en la laguna como el color verdoso del agua, la aparición de espuma, malos olores, y la disminución de la pesca artesanal. Esto ha conllevado al abandono de la pesca en ciertas zonas y a la modificación de usos tradicionales del agua como medio de subsistencia familiar. El deterioro ha generado un ambiente de desconfianza, pues los pobladores temen que las aguas contaminadas afecten su salud y la de sus animales.

En el **cuadro II**, se muestra la categoría “Pensamientos”, que refleja las ideas, juicios y reflexiones de los pobladores frente a las causas y consecuencias de la contaminación en la laguna Umaco. En la subcategoría “Fuentes de contaminación”, los entrevistados identifican tres fuentes principales de contaminación en la laguna. La primera es la minería artesanal, especialmente la extracción de minerales auríferos, vista como una fuente importante de contaminación debido al uso de mercurio en el proceso de amalgamación (Salas-Mercado et al. 2023). Los relaves mineros, con residuos de metales pesados como el mercurio y con

**CUADRO I.** TESTIMONIOS SOBRE SENTIMIENTOS RELACIONADOS CON LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA LAGUNA UMACO.

Categoría	Subcategoría	Descripción	Testimonios representativos de los pobladores
Sentimientos	Enfermedades y mortandad de animales	Impacto directo en fauna silvestre y ganado debido a la contaminación.	- “Vimos vicuñas muertas en 2020, entre 7 y 8.” - “En Patas y Qaqsi, murieron 12 ovejas tras la aparición verdosa del lago.”
	Presencia de contaminación en el tiempo	Observaciones de los habitantes sobre el inicio y evolución de la contaminación en la laguna	- “Se notó desde 1999-2000.” - “Hace 10 años comenzó a avanzar poco a poco.”

**CUADRO II.** EXPRESIÓN DE PENSAMIENTOS DE LOS POBLADORES ANTE EL IMPACTO AMBIENTAL.

Categoría	Subcategoría	Descripción	Testimonios representativos de los pobladores
Pensamientos	Fuentes de contaminantes	Identificación de fuentes como minería, queserías, residuos sólidos y líquidos.	- “La minería y desagües contaminan con metales pesados.” - “Las queserías vierten sustancias al río que llegan a la laguna.”
	Contribución económica de actividades	Beneficios económicos generados por minería y queserías en la comunidad.	- “Las mineras dan empleo temporal.” - “Las queserías generan ingresos mediante la producción de queso artesanal.”

cianuro, se filtran hacia las aguas del lago, afectando la calidad del agua y la vida acuática (Cuentas y Velarde 2017). Este proceso de contaminación persiste incluso después de que las minas han sido cerradas, dejando un legado tóxico. La segunda fuente corresponde a las plantas queseras que, si bien no generan directamente metales pesados, si vierten residuos líquidos con sustancias orgánicas, grasas, detergentes y ácidos lácticos, los cuales deterioran la calidad del agua, reducen el oxígeno disuelto y pueden favorecer la movilización de metales presentes en los sedimentos (Mehennaoui et al. 1999, Amer 2017). Por último, los residuos sólidos y líquidos domésticos, como el vertido de basura y aguas servidas en las aguas del lago, que si bien tampoco aportan directamente metales, sí generan condiciones anóxicas que pueden liberar contaminantes atrapados en el fondo (Ali y Sion 2014, Gonzales y Ferrano 2015).

Con relación a la subcategoría “Contribución económica”, los pobladores reconocen que tanto la minería como las queserías ofrecen empleos e ingresos a algunas familias, a pesar de los efectos negativos de la contaminación. La minería proporciona trabajo en las minas, mientras que las queserías generan ingresos a través de la producción de productos lácteos. Sin embargo, estos beneficios se perciben como insuficientes frente al daño ambiental generado. Por ello, los entrevistados plantean la necesidad de que estas

actividades adopten tecnologías limpias que reduzcan su impacto sobre el ecosistema (Goyzueta y Trigos 2009), Exigiendo mayor responsabilidad ambiental por parte de los operadores de dichas actividades, así como una fiscalización más estricta por parte de las autoridades para garantizar que el desarrollo económico no comprometa la salud humana ni la sostenibilidad de la laguna.

En el **cuadro III**, se muestra la categoría “Actitudes”, la cual refleja los comentarios de los pobladores frente a la problemática ambiental. En la subcategoría “Inacción de autoridades”, se expresa una fuerte percepción de abandono por parte de los gobiernos local, regional y nacional. A pesar de que las autoridades han sido alertadas sobre la contaminación por metales pesados, especialmente de las minas, no se perciben esfuerzos significativos para mitigar el daño. La desidia institucional genera frustración y desconfianza, al considerar que las acciones prometidas durante campañas políticas no se cumplen, lo que refuerza la sensación de desprotección (Iwasa et al. 2007).

Mientras que en “Demanda de intervención”, los pobladores exigen con urgencia que se declare una emergencia ambiental para la laguna Umayo, a fin de movilizar los recursos necesarios para limpiar el lago de los metales pesados y otros contaminantes. La intervención institucional es vista como esencial para restaurar la salud del ecosistema y proteger las

**CUADRO III.** ACTITUDES DE LOS POBLADORES FRENTE A LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

Categoría	Subcategoría	Descripción	Testimonios representativos de los pobladores
Actitudes	Inacción de autoridades	Falta de interés o acción por parte de autoridades locales, regionales y nacionales.	- “Las promesas de descontaminación no se cumplen.” - “Las autoridades no toman interés tras campañas políticas.”
	Demanda de intervención	Exigencia de medidas urgentes para salvar la laguna y evitar mayores impactos.	- “Se necesita una ley de emergencia.” - “PELT, IMARPE y el Ministerio del Ambiente deben intervenir con un trabajo conjunto.”

actividades económicas que dependen de la laguna (Tang et al. 2016, Marteau 2017, Maldonado et al. 2023). Los actores locales demandan que las autoridades implementen políticas más estrictas y tecnológicas para la descontaminación del agua y para la prevención de futuras contaminaciones.

### Concentración de metales pesados en sedimentos de los afluentes y efluentes

La concentración de los elementos en sedimentos de los afluentes y el efluente de la laguna muestran un orden descendente de contaminación por puntos:  $D > A > C > B > E$ , y por elementos:  $P > Cu > Pb > As > Cd > Hg$  (**Cuadro IV**). Las mayores concentraciones de fósforo (P) se presenta en los puntos de muestreo D y E, los que pertenecen a los ríos Ccaccapuncu y Challamayo, respectivamente. Estos ríos transitan por áreas de agricultura intensiva, sugiriendo que su principal aporte provendría de actividad agropecuaria, debido al uso de fertilizantes y la descarga de desechos orgánicos y esto se contrastaría con la diferencia entre el valor base y las concentraciones mencionadas (Wang et al. 2017).

Mientras que, el Hg registra sus mayores concentraciones en los puntos B y C, ambos provienen de la bifurcación del río Vilque, superando el valor base y de PEL. Este afluente transita por zonas con actividades minero-metalúrgicas artesanales, lo que indicaría que su incremento provendría principalmente de dichas actividades, en las que se utiliza este elemento en la formación de amalgamas y su posterior quema, liberando vapores que se depositan en los cuerpos de agua (Wade 2013, Cuentas y Velarde

2017). Aunque la geología local, particularmente las rocas volcánicas del Grupo Barroso, también contribuyen a la presencia natural de Hg, su influencia es menor en comparación con la antrópica, esto debido a que los demás puntos no superan el ISQG (Angeles y Córdova 2021). El As presenta sus valores más altos en los puntos A, B y C, superando el valor base y el ISQG, los que corresponden al efluente Llunco y al afluente Vilque, ambos se ubican al norte de la laguna donde se encuentra la formación litogénica del Grupo Barroso (Rivera 2014, Angeles y Córdova 2021). Esto sugeriría que estos puntos están influenciados por las características geológicas locales, específicamente por la formación Barroso, ya que, durante antiguos procesos volcánicos e hidrotermales, estas rocas, ricas en arsénico, liberaron este elemento a través de la meteorización y erosión de minerales secundarios, como óxidos y sulfuros (Belizario et al. 2019). Por otra parte, las actividades humanas como la agricultura podrían movilizar el arsénico desde los suelos.

El Cd supera el ISQG en los puntos B y C (río Vilque), D (río Ccaccapuncu), E (Challamayo) y en A (efluente Llunco). Los afluentes transitan por zonas de producción artesanal de queso, donde el proceso de elaboración genera suero láctico, un subproducto que contiene aproximadamente el 12 a 14 % del cadmio presente en la leche de vaca (Mehennaoui et al. 1999, Amer 2017). El suero es el residuo que es desechado en suelos y cuerpos de agua cercanos (Maas et al. 2011), transportándose por escorrentía durante la época de lluvias y acumulándose en épocas de sequía en fuentes hídricas de importancia (Gidikova et al.

**CUADRO IV.** CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS DE AFLUENTES Y EFLUENTES DE LA LAGUNA UMACO.

Puntos de muestreo	Hg (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	P (mg/kg)	Pb (mg/kg)	
A (efluente)	0.05	11.5	1.1	40.5	995.9	28.8	
B (afluente)	0.76	14.3	1.9	46.7	745.1	40.6	
C (afluente)	0.62	12.2	1.6	43.4	732.3	37.9	
D (afluente)	0.07	3.6	1.1	25	1313	26.9	
E (afluente)	0.08	3.6	0.9	25	1030	33.9	
Mínimo	0.1	3.6	0.9	25.0	732.3	26.9	
Máximo	0.8	14.3	1.9	46.7	1313.0	40.6	
Promedio	0.3	9.0	1.3	36.1	963.3	33.6	
Desviación estándar	0.3	5.1	0.4	10.4	239.2	5.8	
CCME <sup>‡</sup>	ISQG*	0.17	5.9	0.6	35.7	---	35
	PEL <sup>§</sup>	0.486	17	3.5	197	---	91.3
TUREKIAN	Carbonatos	0.04	1	0.35	4	400	9

Nota: <sup>‡</sup> Directrices de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática de Canadá; \* límite de efecto umbral; <sup>§</sup> límite de efectos probables

2016). El Cu y el Pb superan el ISQG principalmente en los puntos B y C del río Vilque. Esto sugiere que su origen podría deberse a dos fuentes. La primera es antropogénica, asociada a la actividad agrícola, donde el uso de fertilizantes se acumula en el suelo y a la lixiviación de residuos sólidos provenientes de los poblados (Roudposhti et al. 2016; Melián-Navarro y Fernández-Zamudio 2017). La segunda es de origen natural, ya que el área de estudio se ubica en el dominio metalogenético del Perú, donde predominan metales como Zn, Cu y Pb (Hennig et al. 2008). Además, el arado del suelo podría contribuir a su movilización (Zheng et al. 2021).

### Concentración de metales pesados en sedimentos de la laguna Umayo

La concentración total de los elementos en los sedimentos de la laguna Umayo, ordenada de mayor a menor según los puntos de muestreo, sigue la secuencia: L7 > L5 > L8 > L9 > L4 > L6 > L1 > L10 > L11 > L12 > L2 > L3 (**Cuadro V**). En cuanto al promedio de concentración de cada elemento considerando la totalidad de los puntos de muestreo, el orden decreciente es: P > Cu > Pb > As > Cd > Hg. Las concentraciones del P, superan el valor base en todos los puntos, ubicando la concentración máxima en el punto L4, el cual es cercano al río Challamayo.

Además, esto se vincularía con las concentraciones de Cd que presenta su valores máximos en L2, L1 y L3, los cuales se encuentran cercanos a la desembocadura de los ríos Ccaccpunco y Vilque al oeste de la laguna, donde se encuentra las plantas de queso artesanal y la agricultura. Esto sugeriría que estas actividades incrementan las concentraciones de dichos elementos. Para aumentar la producción de leche los ganaderos necesitan disponer de mayor cantidad de alimento, por lo que recurren al uso de fertilizantes que mejoran el crecimiento y la calidad del forraje. El más utilizado es el abono foliar (DRAP 2020). Este tipo de fertilizante se obtiene de rocas fosfóricas, cuyo mineral predominante es la apatita, compuesta principalmente por fósforo y cadmio (Rojas 2022, Bonomelli et al. 2003). Las concentraciones más elevadas de Cu y Pb se registran en el punto L9, donde superan tanto el valor base como el ISQG. Además, los puntos L1 y L10, ubicados en proximidad a las orillas con pendientes pronunciadas, muestran concentraciones considerables (>35 mg/kg). Esto sugiere que esta zona podría estar bajo la influencia del dominio metalogenético previamente mencionado (Acosta et al. 2009), favoreciendo la movilización y dispersión de estos metales hacia el interior de la laguna a través de procesos de erosión y escorrentía (Correa et al. 2016, Zhang y Zhuang 2019).

**CUADRO V.** CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS AL INTERIOR DE LA LAGUNA UMAYO.

Puntos de Muestreo	Hg (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	P (mg/kg)	Pb (mg/kg)
L1	0.64	16.9	2	69.6	805.3	54.7
L2	0.12	3.6	4.4	36.1	914.8	29.9
L3	0.06	3.6	1	20.8	972	28.9
L4	0.06	3.6	0.3	19.6	1460	28.8
L5	0.08	17.1	0.3	15.9	1210	3
L6	0.05	3.6	0.3	12	1073	3
L7	0.08	3.6	0.3	22.1	1033	3
L8	0.23	17.6	0.9	50.8	1099	3
L9	0.41	19.2	1.8	76.1	673.6	57
L10	0.26	26.7	1.1	56.4	1350	41.7
L11	0.26	28.8	0.3	47.3	1360	37.7
L12	0.21	30	1	47.9	1329	31.9
Mínimo	0.05	3.6	0.3	12	673.6	3
Máximo	0.64	30	4.4	76.1	1460	57
Promedio	0.21	15.38	1.12	40.08	1122.98	27.27
Desviación estándar	0.17	10.60	1.14	20.83	239.78	19.07
CCME <sup>‡</sup> ISQG*	0.17	5.90	0.60	35.70	---	35.00
PEL <sup>§</sup>	0.49	17.00	3.50	197.00	---	91.30
TUREKIAN Carbonatos	0.04	1	0.35	4	400	9

Nota: <sup>‡</sup> Directrices de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática de Canadá; \* límite de efecto umbral; <sup>§</sup> límite de efectos probables.

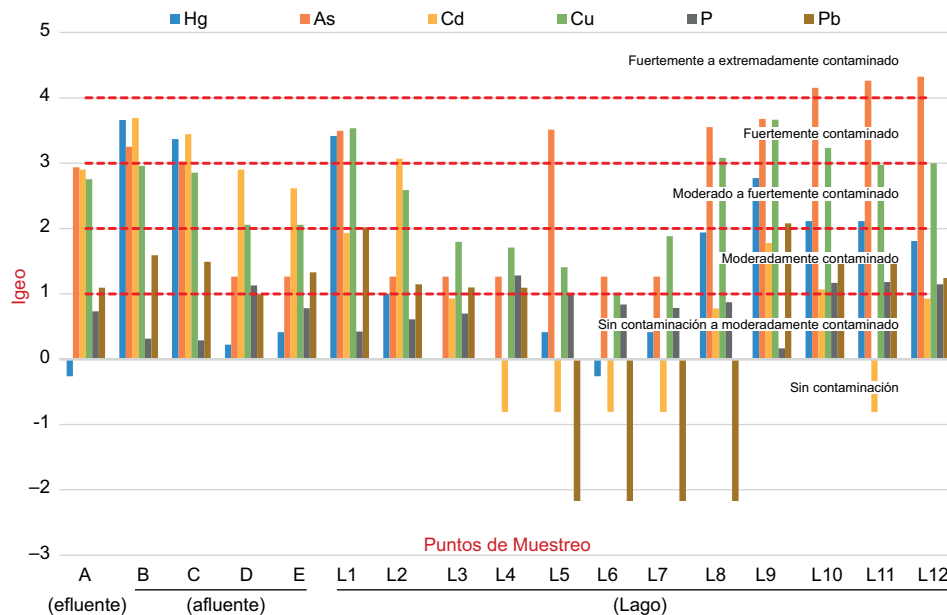
El As presenta sus mayores concentraciones en la parte interior de la laguna desde el punto L8 al L12, superando el valor base y el PEL. La presencia de este elemento está estrechamente vinculada a las características geológicas de la zona (Thouret et al. 2007, Hennig et al. 2008), y su movilización podría ocurrir a través de dos mecanismos principales. El primero está relacionado con la erosión causada por la microfracturación del suelo, un proceso intensificado por la acción de la lluvia y la inclinación del terreno, lo que facilita el arrastre de partículas y su eventual depósito en cuerpos de agua cercanos (Salas-Mercado et al. 2023). El segundo mecanismo corresponde al movimiento del suelo con fines agrícolas, ya sea por el arado, la remoción de tierras o la preparación de terrenos para cultivos, lo que contribuye a la redistribución de los materiales presentes en el sustrato (Correa et al. 2016). Ambos procesos pueden incrementar la disponibilidad de este elemento en el ambiente, generando un riesgo ecológico natural al favorecer su incorporación en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

El Hg alcanza su mayor concentración en el punto L1, ubicado en la desembocadura del río Vilque, superando el valor base y el PEL. Esto sugiere que este afluente está incorporando dicho elemento en la laguna, probablemente como resultado de la minería artesanal de oro. En este proceso, el material aurífero extraído se amalgama con mercurio para recuperar el

oro, utilizando quimbaletes y molinos para la molienda (Salas-Mercado et al. 2023). Además, otra posible fuente de contaminación proviene de la quema de la amalgama para evaporar el mercurio utilizado en el procesamiento, lo que genera emisiones de vapor de mercurio, el cual podría condensarse y precipitarse en forma de lluvia sobre los cuerpos de agua cercanos (Cordy et al. 2013).

### Grado de contaminación de los sedimentos en afluentes, efluentes e interior de la laguna Umayo

La **figura 2** muestra el  $I_{geo}$  de los elementos en los puntos de muestreo del efluente, afluentes e interior de la laguna Umayo. En los ríos, los elementos siguen el siguiente orden decreciente:  $Cd > Cu > As > Hg > Pb > P$ . Mientras que, en la laguna siguieron el orden:  $As > Cu > Hg > P > Cd > Pb$ . El P presenta su mayor valor de  $I_{geo}$  en los afluentes en el punto D (clase 2) y en el interior del cuerpo de agua en los puntos L4 (clase 2), el cual es cercano a D y se estaría distribuyendo hacia el interior de la laguna, lo cual podría provocar la formación de biomasa y su posterior eutrofización (Wang et al. 2017, Shreadah et al. 2020), ya que el fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de fitoplancton y algas (Shimotori et al. 2019). Estos resultados confirmarían lo antes mencionado, donde el uso de fertilizantes en la producción de alimento fresco estaría generando el incremento de este elemento (Agrofarma 2024).



**Fig. 2.** Índice geoquímico ( $I_{geo}$ ) de metales pesados en sedimentos de afluentes, efluentes e interior de la laguna Umayo.

Por otro lado, en los afluentes D y E se registraron valores elevados de  $I_{geo}$  para el Cd, ubicándose en la clase 3. Esto coincide con las concentraciones de fósforo (P) observadas, ya que ambos elementos suelen estar presentes en fertilizantes foliares, según lo reportado por Bonomelli et al. (2003) y Rojas (2022). En el caso de los puntos B y C, donde el Cd alcanza la clase 4, el aumento podría explicarse porque el río atraviesa zonas de plantas queseras, que podrían estar generando esta contaminación, debido a que la elaboración de queso comienza con la coagulación de la caseína, un proceso inducido por la adición de una enzima coagulante (cuajo), lo que da lugar a la formación de la cuajada (parte sólida) y el suero lácteo (parte líquida), los cuales se separan mediante filtración. Posteriormente, mientras el queso madura en condiciones apropiadas, el suero y otros subproductos suelen ser desechados en suelos y cuerpos de agua cercanos (Maas et al. 2011). Mientras que, en el interior de la laguna los valores más altos de  $I_{geo}$  de Cd están en L1 (clase 2) y L2 (clase 4), lo que sugeriría una acumulación de este metal, el cual podría estar ingresando a la cadena trófica por medio de las algas y el llacho que también son aprovechados por el ganado (Maria 2010, Gephart et al. 2017).

Los valores de  $I_{geo}$  del Pb en todos los afluentes se encuentran en la clase 2, así como también los puntos del primer transecto (L1 al L4), esto confirmaría que provendría de la composición metalogenética de la zona donde el Pb es un elemento predominante (Acosta et al. 2009, Quispe et al. 2009). Sin embargo, existe mayor concentración de Cu, y los valores de  $I_{geo}$  en casi todos los puntos de muestreo están entre la clase 3 y 4, y su incremento se debería al uso de fertilizantes, ya que la composición de elementos traza incluye el Cu, y al cambio de uso de suelo para la agricultura (Agrofarma 2024).

La distribución de los valores de  $I_{geo}$  para el As, están en la clase 4 en los puntos de muestreo de afluentes B y C y en el interior de la laguna L1, L9, L10, ubicados en la zona norte, donde se encuentra las pendientes pronunciadas del Grupo Barroso, lo cual confirmaría que existe una contaminación natural producto de la meteorización y erosión de los suelos (Hennig et al. 2008, Heindel et al. 2015, Cadaret et al. 2016). Además, el As ingresaría al cuerpo de agua y se distribuiría en su interior almacenándose posiblemente en el fondo.

El Hg presenta una vía de contaminación bien definida. Ingresa a través del río Vilque en los puntos B y C (clase 4), luego pasa a la laguna por el punto L1 (clase 4) y, desde allí, se distribuye hacia el interior en dirección de los puntos L8 y L9 (clases 2 y 3,

respectivamente). Esto confirmaría que el incremento de este elemento proviene de la actividad minera artesanal, donde uno de los principales insumos para su beneficio es el mercurio (Cuentas y Velarde 2017, Salas-Mercado et al. 2023).

Con respecto al punto A en el efluente, elementos como el As, Cd y Cu están en la clase 3, en especial el Cd y el Cu estarían saliendo desde la laguna hacia aguas abajo.

Este estudio se centró en la evaluación de sedimentos, reconociendo que los metales en esta matriz pueden afectar la calidad del agua al solubilizarse bajo ciertas condiciones, aunque no se abordó su movilidad ni se realizaron inferencias directas sobre dicha calidad. Los resultados sugieren la necesidad de investigaciones futuras que exploren esta dinámica y su impacto ambiental. Asimismo, se comunicaron los hallazgos preliminares a la comunidad mediante reuniones con representantes locales, lo que permitió validar percepciones, fortalecer la confianza y destacar la importancia de una gestión ambiental más efectiva basada en la articulación entre autoridades, sectores productivos y población.

## CONCLUSIONES

El comportamiento social de los pobladores frente a la contaminación en la laguna Umayo ha cambiado significativamente. La presencia de metales pesados y nutrientes en los sedimentos ha generado acciones de adaptación, como el uso restringido del agua para consumo y actividades productivas. Este cambio se enmarca en una historia de ausencia de políticas de protección ambiental efectivas en la región, donde las comunidades han debido enfrentar por décadas la expansión de actividades extractivas sin fiscalización, lo cual ha fortalecido su percepción de abandono institucional. La mortandad de vicuñas y ovejas ha incrementado la percepción de riesgo ambiental y económico. A pesar de identificar fuentes de contaminación, como la minería artesanal y la producción quesera, los pobladores enfrentan un dilema entre el beneficio económico de estas actividades y sus impactos negativos en el ecosistema. Los testimonios recogidos evidencian que el deterioro ambiental ha desencadenado respuestas colectivas, como la migración de ciertas actividades productivas y la exigencia de acciones inmediatas por parte del Estado.

La evaluación de la contaminación por elementos químicos en los sedimentos de los afluentes, efluentes y la laguna Umayo, tienen un claro impacto antrópico y geogénico. El fósforo y el cadmio muestran

las concentraciones más altas, superando los valores base y los estándares de calidad (ISQG y PEL) en varios puntos, especialmente en áreas con actividad agrícola intensiva y producción quesera artesanal. El mercurio y el arsénico también presentan niveles elevados, relacionados con la minería artesanal y las características geológicas locales. La evaluación con el índice geoquímico ( $I_{geo}$ ) confirmó que el Cd, Cu y As alcanzan niveles de contaminación moderada a fuerte en varios puntos de muestreo. En particular, el Cd presentó valores de clase 3 y 4 en afluentes cercanos a zonas agrícolas, mientras que el Hg mostró una ruta de contaminación clara desde el río Vilque hacia el interior de la laguna. Estos resultados indican que la minería, la agricultura y la industria quesera son fuentes clave de contaminación.

La combinación del enfoque científico y social permitió identificar tanto las fuentes de contaminación como su impacto en la comunidad, fortaleciendo la necesidad de una gestión ambiental más efectiva. Esta gestión debería orientarse no solo al monitoreo técnico, sino también a la inclusión de las comunidades locales en la formulación de políticas ambientales y programas de mitigación. La preocupación expresada por los pobladores concuerda con los resultados analíticos, lo que subraya la urgencia de medidas de mitigación. Se recomienda implementar un programa de monitoreo participativo y continuo, que integre el conocimiento local, identifique zonas críticas, y proponga medidas específicas para reducir la carga contaminante en la laguna. Además, se sugiere el fortalecimiento de la legislación ambiental local, adaptando estrategias de remediación acordes a la realidad socio territorial de Umayo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento de los Proyectos de Investigación de Docentes Investigadores de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, otorgado mediante la Resolución Rectoral 1207-2023-R-UNA-Puno y su Adenda 01-2023, así como a través del contrato de financiamiento 044-2023-VRI-UNAPUNO.

## REFERENCIAS

- Achi C.G., Omoniyi A.M., Coker A.O. y Sridhar M.K.C. (2021). Multivariate analysis of sediment quality in River Ogbere, Ibadan, South-West Nigeria. *H<sub>2</sub>Open Journal* 4 (1), 1-11. <https://doi.org/10.2166/H2OJ.2021.057>
- Acosta J., Rivera R., Valencia M., Chirif H., Huanacuni D., Rodriguez I., Villarreal E., Paico D. y Santisteban A. (2009). Memoria: Mapa metalogenético del Perú. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Lima, Perú. [en línea]. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/195724/04/2025>
- Agrofarma. (2024). Cosechador NPK 20-20-20 (Vol. 1). Agrofarma, Lima, Perú. [en línea]. <https://www.agrofarma.pe/wp-content/uploads/2023/08/PRO-FT-A13-COSECHADOR-NPK-202020.pdf> 24/04/2025
- Ali N.E. y Sion H.C. (2014). Solid waste management in Asian countries: A review of solid waste minimisation (3R) towards low carbon. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 18 (1), 012152. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012152>
- Amer A. (2017). Effect of processing of some dairy products on levels of some heavy metals. *Memorias. The Second International Congress of Food Hygiene and Human Health, Assiut, Egypt.* 21 - 23 de octubre, 2023.
- ANA (2016). Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú. [en línea]. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-recursos-hidricos-superficiales> 24/04/2025
- Angeles de la Cruz A.W. y Córdova Castro F.L. (2021). Caracterización geoquímica del grupo Barroso: superior e inferior, relacionada a la mineralización entre los cuadrángulos 29Ñ, 30Ñ, 30O. *Sociedad Geológica del Perú.* [en línea]. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG20-376.pdf> 24/04/2025
- ANA (1979). Levantamiento geotécnico con fines de represamiento de la Laguna Umayo Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, 73 pp.
- Belizario Quispe G., Capacolla Coila J., Huaquisto Ramos E., Cornejo Olarte D.A. y Chui Betancur H.N. (2019). Determinación del contenido de fósforo y arsénico, y de otros metales contaminantes de las aguas superficiales del Río Coata, fuente del lago Titicaca, Perú. *Revista Boliviana de Química* 36 (5), 223-228. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.5.4>
- Bonomelli C., Bonilla C. y Valenzuela A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38 (10), 1179-1186. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2003001000007>
- Cadaret E.M., Nouwakpo S.K., McGwire K.C., Weltz M.A. y Blank R.R. (2016). Experimental investigation of the effect of vegetation on soil, sediment erosion, and salt transport processes in the Upper Colorado River Basin Mancos Shale formation, Price, Utah, EUA. *Catena* 147, 650-662. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.024>

- CCME (1998). Sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. Canadian Council of Ministers of the Environment. Hull, Canada. [en línea]. <https://ccme.ca/en/res/lead-canadian-sediment-quality-guidelines-for-the-protection-of-aquatic-life-en.pdf> 24/04/2025
- CEDER (2015). Plan de desarrollo concertado 2015 - 2025 Atuncolla. Centro de Estudios para el Desarrollo Regional. Puno, Perú. [en línea] <http://ceder.org.pe/prueba/wp-content/uploads/2019/06/PDC-ATUNCOLLA-13-12-16-planes-de-desarrollo.pdf> 24/04/2025
- Cordy P., Veiga M., Crawford B., Garcia O., Gonzalez V., Moraga D., Roeser M. y Wip D. (2013). Characterization, mapping, and mitigation of mercury vapour emissions from artisanal mining gold shops. *Environmental Research* 125, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.10.015>
- Correa S.W., Mello C.R., Chou S.C., Curi N. y Norton L.D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena* 147, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Cuentas Alvarado M. y Velarde Ochoa J. (2017). Uso de mercurio en la Rinconada - Puno. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería* 4 (1), 27-34.
- De la Cruz Toribio L. y Lazo Solano Y.J. (2020). Evaluación de la concentración de mercurio y plomo en *Sarda chiliensis chiliensis* ("bonito") y *Scomber japonicus peruanus* ("caballa") expendido en el terminal pesquero de Ventanilla – Lima, 2019. Tesis de Licenciatura. Instituto de Educación Superior Tecnológico Público Daniel Alcides Carrión, Lima, Perú, 120 pp.
- DRAP (2020). Entregan abono foliar y adherentes para recuperar cultivos afectados por las heladas. Dirección Regional Agraria Puno. Puno, Perú. [en línea]. <https://www.gob.pe/institucion/regionpuno/noticias/340857-agricultores-reciben-ayuda-para-recuperar-cultivos-afectados-por-las-heladas> 24/04/2025
- El-Amier Y.A., Elnaggar A.A. y El-Alfy M.A. (2017). Evaluation and mapping spatial distribution of bottom sediment heavy metal contamination in Burullus Lake, Egypt. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences* 4 (1), 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2016.09.005>
- Estrada-Acuña R.A., Arzuaga M.A., Giraldo C.V. y Cruz F. (2021). Diferencias en el análisis de datos desde distintas versiones de la teoría fundamentada. *EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales* 51, 185-229. <https://doi.org/10.5944/empiria.51.2021.30812>
- Ferreira-Rodríguez N., Castro A.J., Tweedy B.N., Quintas-Soriano C. y Vaughn C.C. (2021). Mercury consumption and human health: Linking pollution and social risk perception in the southeastern United States. *Journal of Environmental Management* 282 (April), 111528. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111528>
- Gephart J.A., Troell M., Henriksson P.J.G., Beveridge M.C.M., Verdegem M., Metian M., Mateos L.D. y Deutsch L. (2017). The 'seafood gap' in the food-water nexus literature issues surrounding freshwater use in seafood production chains. *Advances in Water Resources* 110, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.03.025>
- Gidikova P., Deliradeva R., Chobanova S., Prakova G. y Mihailova G. (2016). Heavy Metal contents in homemade milk and cheese from villages with possible risk of environmental pollution. *Science and Technologies* VI (6), 48-53.
- GRP (2015). Informe final del área de geología región Puno. Gobierno Regional de Puno. Puno, Perú. [en línea]. [https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/memoria\\_descriptiva\\_geologia.pdf](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/memoria_descriptiva_geologia.pdf) 24/04/2025
- Gonzales I.M. y Ferraro R. (2015). Los residuos sólidos urbanos en Mar del Plata, Argentina: ¿problema ambiental o insumos para la industria?. *Letras Verdes* 17, 57-85. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.17.2015.1446>
- Goyzueta G. y Trigos C. (2009). Riesgos de la salud pública en el centro poblado minero artesanal la rincónada (5200 msnm) en Puno, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 26 (1), 41-44.
- Hartig J.H., Krantzberg G. y Alsip P. (2020). Thirty-five years of restoring Great Lakes Areas of Concern: Gradual progress, hopeful future. *Journal of Great Lakes Research* 46 (3), 429-442. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.04.004>
- He Z., Li F., Dominech S., Wen X. y Yang S. (2019). Heavy metals of surface sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: Distribution, speciation and environmental risks. *Journal of Geochemical Exploration* 198, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.12.015>
- Heindel R.C., Chipman J.W. y Virginia R.A. (2015). The spatial distribution and ecological impacts of aeolian soil erosion in Kangerlussuaq, West Greenland. *Annals of the Association of American Geographers* 105 (5), 875-890. <https://doi.org/10.1080/00045608.2015.1059176>
- Hennig D., Lehmann B., Burgess R. y Nekouvaght Tak M.A. (2008). Geology, geochemistry and Ar/Ar ages of the Cerro Millo epithermal high-sulfidation gold prospect, southern Peru. *Ore Geology Reviews* 34 (3), 304-316. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.02.001>
- Hernández-Sampieri R. y Mendoza Torres C.P. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Interamericana, Ciudad de México, México, 744 pp.

- Iwasa Y., Uchida T. y Yokomizo H. (2007). Nonlinear behavior of the socio-economic dynamics for lake eutrophication control. *Ecological Economics* 63, 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.11.003>
- Li J., Li Z., Brandis K.J., Bu J., Sun Z., Yu Q. y Ramp D. (2020). Tracing geochemical pollutants in stream water and soil from mining activity in an alpine catchment. *Chemosphere* 242, 125167. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125167>
- Liu M., Fan D., Liao Y., Chen B. y Yang Z. (2016). Heavy metals in surficial sediments of the central Bohai Sea: their distribution, speciation and sources. *Acta Oceanologica Sinica* 35 (9), 98-110. <https://doi.org/10.1007/s13131-016-0926-6>
- López R.A., Marcomini S.C. y Kalesnik F. (2013). Artificial lakes management in the estuarine plain of the Río de la Plata, Buenos Aires, Argentina. *Ocean and Coastal Management* 77, 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.03.002>
- Mak T.M.W., Yu I.K.M., Wang L., Hsu S.C., Tsang D.C.W., Li C.N., Yeung T.L.Y., Zhang R. y Poon C.S. (2019). Extended theory of planned behaviour for promoting construction waste recycling in Hong Kong. *Waste Management* 83, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.016>
- Maldonado I., Miranda-Mamani J. y Paredes-Espinal C. (2023). Heavy metals and ecological alterations resulting from wastewater discharge in Inner Puno Bay, Lake Titicaca. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 20, 200903. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100903>
- Maria S. (2010). Soil microbial biomass in organic farming system biomassa microbiana do solo em sistemas orgânicos. *Ciência Rural* 40 (10), 2419-2426. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000192>
- Marteau T.M. (2017). Towards environmentally sustainable human behaviour: Targeting non-conscious and conscious processes for effective and acceptable policies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 375 (2095). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0371>
- Mehennaoui S., Delacroix-Buchet A., Duche A., Enriquez B., Kolf-Clauw M. y Milhaud G. (1999). Comparative study of cadmium transfer in ewe and cow milks during rennet and lactic curds preparation. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 37 (3), 389-395. <https://doi.org/10.1007/s002449900530>
- Melián-Navarro A. y Fernández-Zamudio M.Á. (2017). Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente. *Agua y Territorio* 8, 80. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3298>
- MINCETUR (2023). Isla Umayo. Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. [en línea]. [https://consultasenlinea.mincetur.gob.pe/fichaInventario/index.aspx?cod\\_Ficha=11802\\_24/04/2025](https://consultasenlinea.mincetur.gob.pe/fichaInventario/index.aspx?cod_Ficha=11802_24/04/2025)
- Munguía R. P. y López R. P. (1999). Integridad biótica de ambientes acuáticos. [en línea]. <https://cmap-public.ihmc.us/rid=1NH4CN4W7-6L9TMJ-29JK/Evaluaci%C3%B3n%20Bi%C3%B3tica.pdf24/04/2025>
- Phiri H., Mushagalusa D., Katongo C., Sibomana C., Ajode M.Z., Muderhwa N., Smith S., Ntakimazi G., De Keyzer E.L.R., Nahimana D., Mulungula P.M., Haambiya L.H., Isumbisho P.M., Limbu P., Kimirei I.A., Marwa N.B., Mlingi R.J. y Mangaza A.M. (2023). Lake Tanganyika: Status, challenges, and opportunities for research collaborations. *Journal of Great Lakes Research* 6 (49), 102223. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.07.009>
- Proactivo (2020). Atuncolla, Puno: denuncian contaminación del lago Umayo debido a la minería informal. [en línea]. <https://proactivo.com.pe/atuncolla-puno-denuncian-contaminacion-del-lago-umayo-debido-a-la-mineria-informal/24/04/2025>
- Quispe J., Daniel C., Chipana L. y Rodríguez R. (2009). Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. [en línea]. [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3499\\_24/04/2025](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3499_24/04/2025)
- Quispe-Mamani E. (2021). Imaginario social de actores locales sobre la contaminación ambiental minera en el altiplano peruano. *Revista de Ciencias Sociales* 4-29. <https://doi.org/10.31876/rcs.v28i1.37693>
- Rangecroft S., Dextre R.M., Richter I., Grados Bueno C.V., Kelly C., Turin C., Fuentealba B., Hernandez M.C., Morera S., Martin J., Guy A. y Clason C. (2023). Unravelling and understanding local perceptions of water quality in the Santa basin, Peru. *Journal of Hydrology* 625 (PA), 129949. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129949>
- Rivera Mantilla H. (2014). Caracterización geoquímica de los intrusivos de las superunidades de Yarabamba-Challaviento y de los volcánicos de los grupos Toquepala y Barroso y análisis correlacional con la mineralización en el sur del Perú. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú, 195 pp.
- Rojas Jaimes P.A. (2022). Identificación de cadmio (Cd) soluble en rocas fosfóricas y su relación con diversas propiedades encontradas sobre yacimientos empleados para la producción de fertilizantes de la Cordillera Oriental. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia, 42 pp.
- Roudposhti G.M., Karbassi A. y Baghvand A. (2016). A pollution index for agricultural soils. *Archives of*

- Agronomy and Soil Science 62 (10), 1411-1424. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1154542>
- Salas-Ávila D., Chura F.F.C., Quispe G.B., Mamani E.Q., Huanqui-Pérez R., Coaquira E.V., Bernedo-Colca F., Salas-Mercado D. y Hermoza-Gutiérrez M. (2021). Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Suches, Puno, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua* 12 (6), 145-195. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2021-06-04>
- Salas-Mercado D., Belizario-Quispe G. y Horna-Muñoz D. (2023). Heavy metal pollution assessment in lake Rinconada in the southern Andes, Peru. *Pollution* 9 (2), 477-493. <http://doi.org/10.22059/POLL.2022.346689.1558>
- Shimotori K., Imai A., Kohzu A., Komatsu K., Koshikawa M.K., Hayashi S. y Watanabe M. (2019). Long-term observations of the vertical distributions of mineral elements and phosphorus dynamics in sediments in a shallow eutrophic lake in Japan. *Journal of Soils and Sediments* 19 (3), 1566-1575. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2159-0>
- Shreadah M.A., El-Rayis O.A., Shaaban N.A. y Hamdan A.M. (2020). Water quality assessment and phosphorus budget of a lake (Mariut, Egypt) after diversion of wastewaters effluents. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 2003-2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08878-y>
- Sigé B., Sempere T., Butler R.F., Marshall L.G. y Crochet J.Y. (2004). Age and stratigraphic reassessment of the fossil-bearing Laguna Umayo red mudstone unit, SE Peru, from regional stratigraphy, fossil record, and paleomagnetism. *Geobios* 37 (6), 771-794. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2003.06.006>
- Szczepańska, K., Dembska, G., Zegarowski, Ł., Galer-Tatarowicz, K., Aftanas, B. (2017). Determination of phosphorus content in marine sediment samples using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) technique after microwave-assisted aqua regia digestion. *Biuletyn Instytutu Morskiego w Gdańsku* 32 (1), 66-71. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.8784>
- Taipale S.J., Vuorio K., Strandberg U., Kahilainen K.K., Järvinen M., Hiltunen M., Peltomaa E. y Kankaala P. (2016). Lake eutrophication and brownification downgrade availability and transfer of essential fatty acids for human consumption. *Environment International* 96, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.08.018>
- Tang Z., Guo Z., Zhou L., Xue S., Zhu Q. y Zhu H. (2016). Combined and relative effect levels of perceived risk, knowledge, optimism, pessimism, and social trust on anxiety among inhabitants concerning living on heavy metal contaminated soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (1076), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111076>
- Teran Dianderas A. G. (2024). Efecto del caolín (Chaco) en la remediación del drenaje ácido de la SMRL Acumulación Los Rosales - Puno. Tesis de Doctorado. Escuela de Posgrado, Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Puno, Perú, 24 pp.
- Thouret J.C., Wörner G., Gunnell Y., Singer B., Zhang X. y Souriot T. (2007). Geochronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. *Earth and Planetary Science Letters* 263 (3-4), 151-166. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.023>
- Turekian K.K., Wedepohl K.H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72 (2), 175-192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DO TEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DO TEIS]2.0.CO;2)
- USEPA (1996). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EUA [en línea]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3050b.pdf> 24/04/2025
- USEPA (2018). Method 6010D (SW-846): Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EUA [en línea]. <https://www.epa.gov/esam/method-6010d-inductively-coupled-plasma-optical-emission-spectrometry> 24/04/2025
- USEPA (2007). Method 7471B: Mercury in solid or semisolid waste (manual cold-vapor technique). United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EUA [en línea]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/7471b.pdf> 24/04/2025
- Valles M.S. (1999). Técnicas cualitativas de investigación social. Reflexión metodológica y práctica profesional. 1a. ed, Síntesis, Vallehermoso, Madrid, España, 416 pp.
- Vilca Q.C.I. (2022). Determinación de los niveles de mercurio y plomo de las aguas superficiales en la unidad hidrográfica del río Lampa y su relación con el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental (ECA) para el periodo 2021. Tesis de Licenciatura. Universidad Privada San Carlos. Puno, Perú. 140 pp.
- Wade L. (2013). Gold's dark side. *Science* 341 (6153), 1448-1449. <https://doi.org/10.1126/science.341.6153.1448>
- Wang L.F., Yang L.Y., Kong L.H., Li S., Zhu J.R. y Wang Y.Q. (2014). Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China. *Journal of Geochemical Exploration* 140, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.008>

- Wang T., Liu J., Xu S., Qin G., Sun Y. y Wang F. (2017). Spatial distribution, adsorption/release characteristics, and environment influence of phosphorus on sediment in reservoir. *Water* 9 (9), 724. <https://doi.org/10.3390/w9090724>
- Yang, J., Bai, J., Liu, M., Chen, Y., Wang, S., y Yang, Q. (2018). Determination of phosphorus in soil by ICP-OES using an improved standard addition method. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* 1-8. <https://doi.org/10.1155/2018/1324751>
- Zhang H. y Zhuang L. (2019). The impact of soil erosion on internal migration in China. *PLoS One* 14 (4), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215124>
- Zheng K., Cheng J., Xia J., Liu G. y Xu L. (2021). Effects of soil bulk density and moisture content on the physico-mechanical properties of paddy soil in plough layer. *Water* 13 (16), 2290. <https://doi.org/10.3390/w13162290>