

Conexiones geoquímicas entre suelos y sedimentos en la microcuenca de Umayo mediante análisis multivariado y factores de enriquecimiento

Geochemical linkages between soils and sediments in the Umayo microbasin using multivariate analysis and enrichment factors

 Dante A. Salas-Ávila^{1*},  Luis D. Lipa-Quispe¹,  Kelly P. Huilca-Cruz¹,  Nelson M. Humala-Lopez^{1,2},
 Cristian C. Leque-Valenzuela¹,  Nesareth Fuentes-Mamani¹,  Pedro J. Quispe Aymachoque³ y
 Andrea S. Vargas-Trinidad⁴

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la contaminación por metales pesados en sedimentos fluviales, lacustres y suelos circundantes a la laguna Umayo, a fin de identificar sus posibles fuentes. Se recolectaron muestras en diferentes puntos, fueron secadas, tamizadas y digeridas ácidamente, y el análisis de metales se realizó mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente. Se aplicaron el factor de enriquecimiento, análisis de correlación y componentes principales para determinar el grado de contaminación y las asociaciones entre elementos. Los valores más altos se registraron para Hg (hasta 2,35 mg/kg) y Cd (hasta 4,82 mg/kg), superando los niveles permisibles de la normativa canadiense. El EF indicó enriquecimiento significativo a muy alto para Hg y Cd en sedimentos aguas abajo de actividades mineras y lácteas. El PCA agrupó a Hg, Cd y Pb con puntos asociados a fuentes antrópicas, mientras que Cr, Ni y Zn mostraron patrones de origen natural. Estos resultados evidencian un impacto relevante de las actividades humanas en la cuenca, con implicaciones para la gestión ambiental y la calidad del ecosistema lacustre.

Palabras clave: calidad ambiental; contaminación por metales; cuerpos de agua continentales; procesos geoquímicos; impacto antrópico.

Abstract

The objective of this study was to evaluate heavy metal contamination in fluvial sediments, lacustrine sediments, and soils surrounding Lake Umayo in order to identify potential sources. Samples were collected at different points, dried, sieved, acid-digested, and analyzed for metals using ICP-OES. Enrichment factor (EF), correlation analysis, and principal component analysis (PCA) were applied to determine the degree of contamination and the associations between elements. The highest values were recorded for Hg (up to 2.35 mg/kg) and Cd (up to 4.82 mg/kg), exceeding the permissible levels established by Canadian guidelines. EF indicated significant to very high enrichment for Hg and Cd in sediments downstream of mining and dairy activities. PCA grouped Hg, Cd, and Pb with sites associated with anthropogenic sources, while Cr, Ni, and Zn showed patterns of natural origin. These findings highlight a relevant impact of human activities on the basin, with implications for environmental management and the quality of the lacustrine ecosystem.

Keywords: water pollution, chemical elements, geochemistry, soil resources, sediments.

Recibido: 14/08/2025

Aceptado: 20/12/2025

Publicado: 23/12/2025

Sección: Artículo Original

***Autor correspondiente:** dsalas@unap.edu.pe

Introducción

El ambiente natural contiene diversos elementos químicos esenciales para los ciclos biogeoquímicos (Pérez-Portilla et al., 2024). Sin embargo, concentraciones anómalas, ya sean naturales o por actividad humana, pueden generar contaminantes que alteran el equilibrio ecológico (Ahmad et al., 2024; K. Wang et al., 2024). Esto es particularmente problemático en ecosistemas sensibles como las lagunas altoandinas, donde las condiciones extremas limitan la autorregulación (Custodio et al., 2023). Los metales pesados, como el arsénico, cadmio, plomo, mercurio y cobre, son particularmente problemáticos debido a su toxicidad y persistencia ambiental (Swarnalatha et al., 2015). Carecen de funciones biológicas esenciales

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno, Perú.

² Escuela profesional de Geología, Universidad Central de Chile, Santiago de Chile, Chile.

³ Escuela Profesional de ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno, Perú

⁴ CHANGINS, University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland (HES-SO), Nyon, Switzerland.

Como citar: Salas-Ávila, D. A., Lipa-Quispe, L. D., Huilca-Cruz, K. P., Humala-Lopez, N. M., Leque-Valenzuela, C. C., Fuentes-Mamani, N., Quispe-Aymachoque, J. P., & Vargas-Trinidad, A. S. (2025). Conexiones geoquímicas entre suelos y sedimentos en la microcuenca de Umayo mediante análisis multivariado y factores de enriquecimiento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 27, e27753. <https://doi.org/10.18271/ria.2025.753>



Attribution 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Share-Adapt

y pueden causar graves daños a organismos acuáticos y terrestres, además de representar un riesgo para la salud humana (Liu et al., 2021). Su origen puede ser geogénico (meteorización de rocas) o antrópico (minería, agricultura, actividades urbanas) (Ahmad et al., 2024; Cáceres et al., 2025).

Los sedimentos de los cuerpos de agua actúan como depósitos naturales de metales, tanto los que se transportan en suspensión como los que son arrastrados (Salas-Mercado et al., 2020). Estos metales pueden volver al agua si cambian las condiciones físico-químicas, como el pH, la oxigenación, o si hay una remoción mecánica (Ateş et al., 2020; Taheri et al., 2014; Ticona et al., 2021). Por ello, el análisis geoquímico de los sedimentos es crucial para evaluar la calidad ambiental y los procesos de contaminación (Gomes et al., 2010; Sepúlveda et al., 2019). Las lagunas altoandinas, tienen condiciones específicas como ciclos de congelación y deshielo, alta radiación UV y suelos con poca materia orgánica, lo que favorece la movilidad y disponibilidad de metales pesados (Zingaro et al., 2019). Estudios recientes han demostrado que, incluso en ausencia de fuentes puntuales, estos ambientes acumulan elementos contaminantes, reflejando tanto procesos geológicos como influencias antrópicas (Quino Lima et al., 2021; Yacoub et al., 2015).

Se han detectado altas concentraciones de metales en sedimentos superficiales de lagos altoandinos en Perú, Ecuador y Chile. En el norte de Chile, los niveles de As y Pb excedieron los límites internacionales, atribuidos a la minería y al transporte atmosférico (Pérez-Portilla et al., 2024; Rivera et al., 2020; Tapia et al., 2019). En Ecuador, las lagunas utilizadas para agricultura presentaron mayores concentraciones de Pb y Cu en comparación con áreas protegidas (Correa et al., 2015; Pesantes et al., 2019). En la Bahía de Puno, las concentraciones de As, superaron los niveles geogénicos naturales (Maldonado et al., 2023). Estos hallazgos sugieren que las actividades humanas incrementan la contaminación, independientemente de la geología local. Además, la minería artesanal ha impactado significativamente los niveles de Hg, Pb y As en sedimentos y suelos. En la cuenca del lago Rinconada, se encontraron niveles críticos de Hg relacionados con métodos tradicionales sin control ambiental (Salas-Mercado et al., 2023). En Camaná, la disposición inadecuada de relaves ha aumentado la presencia de Cd y Pb en suelos agrícolas. Adicionalmente, prácticas agropecuarias no reguladas han causado contaminación difusa de elementos como Fe y Cr en ecosistemas cercanos (Cáceres et al., 2025).

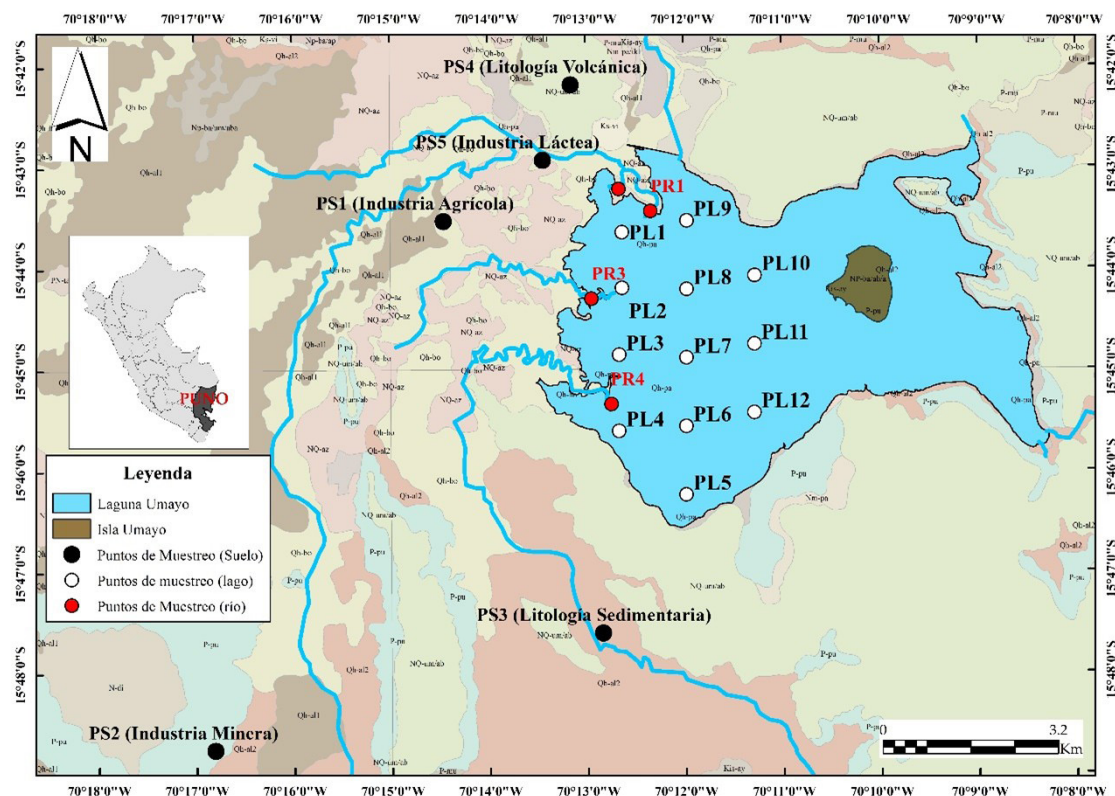
En este contexto, herramientas analíticas como el Factor de Enriquecimiento (EF) son útiles para medir el grado de contaminación y diferenciar entre aporte naturales y antrópicos (Salas-Mercado et al., 2022). Además, el Análisis de Componentes Principales (PCA) ayuda a identificar patrones multielementales y fuentes comunes de contaminación (Gradilla-Hernández et al., 2020; Salas-Mercado et al., 2023). Si bien estas metodologías han sido aplicadas con éxito en ambientes acuáticos, aún existe una brecha en su uso conjunto para analizar de manera integrada suelos y sedimentos de cuencas altoandinas. Aunque hay cierto conocimiento sobre la contaminación en lagos altoandinos, pocos han explorado la conexión geoquímica entre suelos de cuenca, sedimentos ríos y los de la laguna (Salas-Ávila et al., 2021). Esta falta de integración limita la comprensión de las dinámicas de transporte y acumulación de contaminantes.

En consecuencia, el objetivo de este estudio es determinar las conexiones geoquímicas entre los suelos de la cuenca y los sedimentos fluviales y lacustres de la laguna Umayo mediante análisis multivariado y el factor de enriquecimiento, con el fin de identificar las principales fuentes de contaminación por elementos químicos y caracterizar su grado de acumulación.

Materiales y Métodos

Descripción del Área de Estudio

La laguna Umayo se ubica en la provincia y departamento de Puno (Figura 1). Se encuentra en una depresión natural rodeada de cerros y laderas con topografía irregular, a una altitud de 3 844 m.s.n.m., dentro de la subcuenca del río Umayo, afluente del sistema del lago Titicaca (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR), 2023). Tiene una superficie de 35,38 km², un perímetro de 28,1 km y una profundidad media de 4,5 m. El clima es frío, con precipitaciones anuales concentradas entre diciembre y marzo (hasta 800 mm) y temperaturas que varían entre -1,6 °C y 16,4 °C (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 1979). Geológicamente, el entorno de la laguna está conformado por el Grupo Moho (sedimentario), el Grupo Barroso (volcánico) y depósitos fluvioglaciares cuaternarios (Gobierno Regional de Puno (GRP), 2015). La laguna recibe aportes de varios afluentes temporales y drena a través del río Llungo, lo que la convierte en un sumidero natural vulnerable a contaminantes provenientes de la cuenca.

**Figura 1**

Mapa de ubicación de puntos de muestreo de suelos, sedimentos fluviales y lacustres

Recolección y Preparación de Muestras

Se efectuó el muestreo en 2023, durante la época seca, entres entornos de la laguna Umayo. En el terrestre se seleccionaron cinco puntos: dos según el tipo de roca (volcánica y sedimentaria) y tres próximos a zonas económicas (minera, agrícola y láctea), recolectando 500 g de suelo o roca por sitio conforme a Chirenje et al. (2004). En el fluvial se definieron cuatro puntos en afluentes de flujo permanente, ubicados a 50 m de su ingreso a la laguna, siguiendo el protocolo ANA (2016). En el lacustre se establecieron 12 estaciones en transectos paralelos, según Rydberg et al. (2012), Salas-Mercado et al. (2023) y Wang et al. (2014). Los sedimentos fluviales se obtuvieron con espátula de plástico y los lacustres con draga Ekman (250 g por estación). Todas las muestras se tamizaron (230 μ m), almacenaron en bolsas de polietileno y conservaron a 4 °C hasta su análisis.

Determinación y Evaluación de Concentración de Elementos Químicos

Las muestras de suelo se analizaron en el Laboratorio de Análisis Químico de la Universidad Católica de Santa María y las de sedimentos en ALS CORLAB, ambos acreditados por el Instituto Nacional de Calidad. Se evaluaron los elementos Hg, Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, P, Pb y Ti mediante digestión ácida (EPA 3050B) y espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (EPA 6010D). Los

suelos se compararon con el ECA para uso agrícola en Perú (ECA, 2017), y los sedimentos con las Directrices Canadienses de Calidad de Sedimentos (ISQG y PEL; CCME, (1998)), ante la ausencia de normativa nacional. Aunque estas referencias no cubren todos los elementos, su inclusión permite evaluar interacciones que pueden modificar la movilidad, biodisponibilidad o toxicidad de metales traza (Quino Lima et al., 2021; Zingaro et al., 2019).

Evaluación del Grado de Contaminación de Elementos Químicos

El grado de contaminación en los sedimentos, se evaluó mediante el Factor de Enriquecimiento (EF), calculado como:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_{elemento}^i}{Fe_{elemento}^i} \right)}{\left(\frac{C_{fondo}^i}{Fe_{fondo}^i} \right)}$$

Donde $\left(\frac{C_{elemento}^i}{Fe_{elemento}^i} \right)$, corresponde a la relación entre la concentración del elemento y la de Fe, empleado como referencia por su estabilidad geoquímica y baja movilidad. $\left(\frac{C_{fondo}^i}{Fe_{fondo}^i} \right)$, representa el valor de fondo, obtenido a partir del promedio de las concentraciones de suelos de afloramientos rocosos sin alteración antrópica (PS3 y PS4). Esta estrategia, utilizada también por Yuan et al. (2020), en sedimentos del río Yangtze, reduce sesgos

asociados a suelos perturbados. Los valores de EF se interpretaron según Sutherland (2000): < 2 (ausente o mínimo), 2–5 (moderado), 5–20 (significativo), 20–40 (muy alto) y > 40 (extremo).

Análisis Multivariado de Elementos Químicos en Matrices Ambientales

Se emplearon el coeficiente de correlación de Spearman y el Análisis de Componentes Principales (PCA) como herramientas multivariantes complementarias para evaluar las relaciones no paramétricas entre los elementos químicos, reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y agrupar variables y sitios con comportamientos geoquímicos similares. Este enfoque metodológico permitió identificar patrones de asociación, diferenciar posibles

fuentes naturales y antrópicas, y analizar los procesos de transporte y acumulación de elementos químicos en suelos y sedimentos (Salas-Mercado et al., 2022).

Resultados

Concentración de Elementos Químicos en Suelos

La Tabla 1 muestra que, en suelos, las concentraciones promedio siguieron el orden $Fe > Al > Ti > Cu > P > As > Zn > Pb > Cr > Co > Ni > Hg > Cd$. Entre los regulados, el As superó el ECA en PS3 y PS4, y el Pb en PS1, PS2 y PS4, con este último como el de mayor valor; el Cr no excedió los límites y Cd y Hg no fueron detectados. Entre los no regulados, Ni, Co, Cu y Zn destacaron en PS3, Fe en PS4, Al en PS3, y Ti y P en PS1, PS2 y PS5, asociados a zonas industriales.

Tabla 1

Concentración de elementos químicos en suelos

Puntos de Muestreo	Hg (mg/kg)	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	P (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ti (mg/kg)	Zn (mg/kg)
PS1	0.01	42701.69	12.92	0.001	31.58	38.76	298.59	52872.52	27.28	1124.03	256.96	5091.88	404.82
PS2	0.01	39011.58	40.07	0.001	17.81	48.98	1390.62	95845.95	20.78	1656.28	0.00	5704.96	89.05
PS3	0.01	12914.62	2045.15	0.001	176.58	14.53	15359.86	346680.82	262.58	404.56	257.04	914.17	1023.69
PS4	0.01	67622.39	126.40	0.001	2.01	8.03	104.33	14397.07	1.01	207.67	669.14	552.77	83.27
PS5	0.01	30186.70	1.28	0.001	39.64	161.13	84.40	54707.16	47.32	3131.71	21.74	7012.79	241.69
Mínimo	0.01	12914.62	1.28	0.001	2.01	8.03	84.40	14397.07	1.01	207.67	0.00	552.77	83.27
Promedio	0.01	38487.40	445.16	0.001	53.52	54.28	3447.56	112900.71	31.79	1304.85	240.98	3855.31	368.50
Máximo	0.01	67622.39	2045.15	0.001	176.58	161.13	15359.86	346680.82	262.58	3131.71	669.14	7012.79	1023.69
SD	0.00	19935.84	895.76	0.000	70.26	62.06	6680.90	133825.30	23.87	1173.45	269.25	2935.86	389.27
ECA suelo	6.6	---	50	1.4	---	400	---	---	---	---	70	---	---

Concentración de Elementos Químicos en los Sedimentos Fluviales

La Tabla 2 indica que, en sedimentos fluviales, las concentraciones promedio fueron $Fe > Al > P > Ti > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > As > Cd > Hg$. El Hg superó el PEL en PR1 y PR2, y el Cd excedió el ISQG en todos los puntos. En PR1 y PR2, As, Cu, Pb y Zn también sobrepasaron el ISQG, mientras que el Cr no excedió límites. Entre los no regulados, Ni y Co fueron mayores en PR1 y PR2, P en PR3 y PR4, y Al, Fe y Ti mostraron valores similares en todos los sitios.

Concentración de Elementos Químicos en los Sedimentos Lacustres

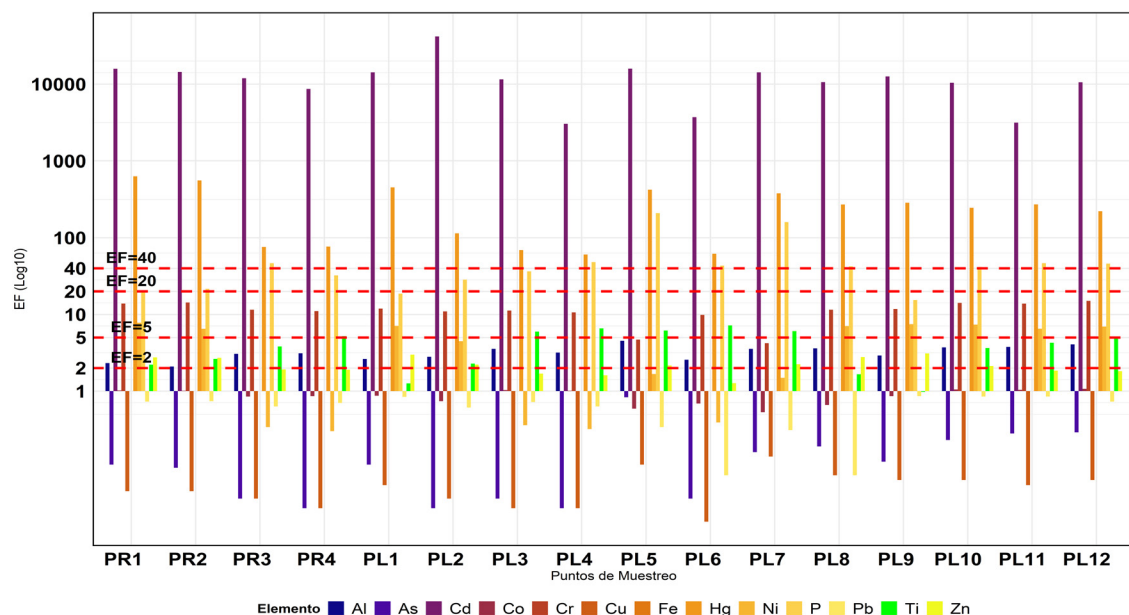
La Tabla 3 indica que, en sedimentos lacustres, las concentraciones promedio fueron $Fe > Al > P > Ti > Zn > Cu > Pb > Ni > As > Cr > Co > Cd > Hg$. Hg y Cd superaron umbrales en varios puntos, destacando PL1 y PL2; As y Pb excedieron principalmente en el sector norte; Cu y Zn en PL1, PL2 y PL8–PL10. Entre los no regulados, Fe, Al, Ti y Ni fueron máximos en PL1–PL2, P en PL1–PL3 y Co en PL2–PL3. Se registraron concentraciones más altas en PL1–PL2, intermedias en PL3 y bajas en PL4–PL5.

Tabla 2*Concentración de elementos químicos en sedimentos fluviales*

Puntos de Hg Muestreo (mg/kg)	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	P (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ti (mg/kg)	Zn (mg/kg)	
PR1	0.76	11228.00	14.30	1.90	10.90	18.80	46.70	21675.00	29.70	745.10	40.60	194.80	182.80
PR2	0.62	9357.00	12.20	1.60	10.00	17.90	43.40	20039.00	22.90	732.30	37.90	214.10	167.10
PR3	0.07	11361.00	3.60	1.10	7.00	12.00	25.00	16662.00	1.00	1313.00	26.90	258.50	98.00
PR4	0.08	13083.00	3.60	0.90	8.00	13.00	25.00	18839.00	1.00	1030.00	33.90	398.40	110.00
Mínimo	0.07	9357.00	3.60	0.90	7.00	12.00	25.00	16662.00	1.00	732.30	26.90	194.80	98.00
Promedio	0.38	11257.25	8.43	1.38	8.98	15.43	35.03	19303.75	13.65	955.10	34.83	266.45	139.48
Máximo	0.76	13083.00	14.30	1.90	10.90	18.80	46.70	21675.00	29.70	1313.00	40.60	398.40	182.80
SD	0.36	1522.71	5.64	0.46	1.79	3.42	11.65	2110.15	14.87	275.34	5.96	91.92	41.75
PEL	0.486	---	17	3.5	---	90	197	---	---	---	91.3	---	315
ISQG	0.17	---	5.9	0.6	---	37.3	35.7	---	---	---	35	---	123

Tabla 3*Concentración de elementos químicos en sedimentos lacustres*

Puntos de Hg Muestreo	Hg (mg/kg)	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	P (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ti (mg/kg)	Zn (mg/kg)
PL1	0.64	14839.00	16.90	2.00	10.90	18.90	69.60	25412.00	31.80	805.30	54.70	129.80	233.10
PL2	0.12	11850.00	3.60	4.40	7.00	13.00	36.10	19005.00	15.00	914.80	29.90	176.10	129.30
PL3	0.06	12421.00	3.60	1.00	8.00	11.00	20.80	15693.00	1.00	972.00	28.90	379.80	81.50
PL4	0.06	12699.00	3.60	0.30	8.90	11.90	19.60	17881.00	1.00	1460.00	28.80	478.90	88.40
PL5	0.08	3442.00	17.10	0.30	1.00	1.00	15.90	3407.00	1.00	1210.00	3.00	85.10	22.60
PL6	0.05	8389.00	3.60	0.30	5.00	9.00	12.00	14609.00	1.00	1073.00	3.00	427.20	56.70
PL7	0.08	3016.00	3.60	0.30	1.00	1.00	22.10	3804.00	1.00	1033.00	3.00	93.60	26.10
PL8	0.23	12314.00	17.60	0.90	5.00	11.00	50.80	15312.00	19.00	1099.00	3.00	103.50	130.60
PL9	0.41	16736.00	19.20	1.80	11.00	19.00	76.10	25829.00	34.00	673.60	57.00	103.30	245.60
PL10	0.26	15794.00	26.70	1.10	9.90	16.90	56.40	19108.00	24.80	1350.00	41.70	282.80	124.20
PL11	0.26	14507.00	28.80	0.30	8.90	14.90	47.30	17251.00	19.80	1360.00	37.70	299.20	97.90
PL12	0.21	15505.00	30.00	1.00	9.00	16.00	47.90	17078.00	20.90	1329.00	31.90	342.30	95.30
Mínimo	0.05	3016.00	3.60	0.30	1.00	1.00	12.00	3407.00	1.00	673.60	3.00	85.10	22.60
Promedio	0.21	11792.67	14.53	1.14	7.13	11.97	39.55	16199.08	14.19	1106.64	26.88	241.80	110.94
Máximo	0.64	16736.00	30.00	4.40	11.00	19.00	76.10	25829.00	34.00	1460.00	57.00	478.90	245.60
SD	0.18	4579.76	10.58	1.18	3.46	6.02	21.67	6872.23	12.74	242.76	19.87	143.46	69.86
PEL	0.486	---	17	3.5	---	90	197	---	---	---	91.3	---	315
ISQG	0.17	---	5.9	0.6	---	37.3	35.7	---	---	---	35	---	123

Figura 2*Valores del factor de enriquecimiento de los sedimentos fluviales y lacustres*

Evaluación del Grado de Contaminación de Elementos Químicos

La Figura 2 muestra que Hg y Cd registraron los mayores EF en sedimentos fluviales y lacustres, alcanzando el nivel extremo; en ríos, Hg fue máximo en PR1–PR2 y Cd en PR3–PR4. El P presentó enriquecimiento significativo en PR3, y moderado en otros puntos, destacando PR4; en la laguna Umayo, fue significativo en PL3–PL8 y PL10–PL12. Ni y Zn mostraron enriquecimiento moderado en PR1–PR2 y en PL1, PL2, PL8 y PL9, mientras que Al lo hizo en PR3–

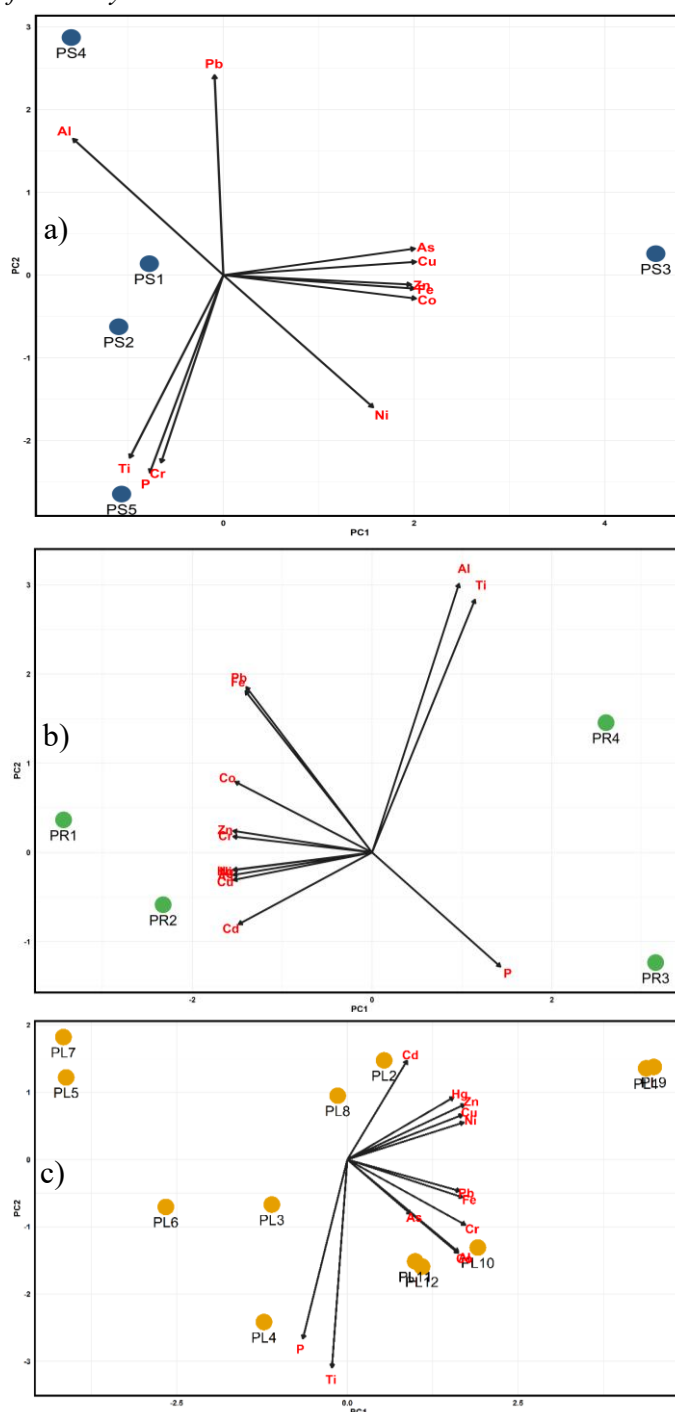
PR4 y PL3–PL5. Los demás elementos permanecieron en niveles de ausencia o mínimo enriquecimiento.

Análisis Multivariado de Elementos Químicos en Matrices Ambientales

Las correlaciones entre matrices fueron muy altas y significativas: $\rho = 0.87$ (suelo–sedimento fluvial), $\rho = 0.93$ (suelo–sedimento lacustre) y $\rho = 0.96$ (sedimento fluvial–lacustre), lo que indica una fuente común y procesos compartidos de transporte y deposición en la laguna Umayo.

Figura 3

Planos principales de las muestras de suelos, sedimentos fluviales y lacustres



La Figura 3 ilustra estas relaciones: en (a) suelos, Hg y Cd estuvieron ausentes; As, Cu, Zn, Fe y Co se asociaron con roca volcánica, y Al y Pb con roca sedimentaria; PS1 y PS2 no mostraron asociaciones fuertes. En (b) sedimentos fluviales, PR1–PR2 se vincularon con As, Cd, Cr, Co, Hg, Ni y Zn; PR3 con P; y PR4 con Al y Ti. En (c) sedimentos lacustres, PL9 y PL1 se asociaron con Zn, Cu, Ni y Hg; PL2 con Cd; PL10–PL12 con Cr, Co y As; y PL4 con P y Ti, mientras que otros puntos no presentaron asociaciones definidas.

Discusión

En la cuenca Umayo, los niveles de Hg que superan el PEL en sedimentos fluviales aguas abajo de industrias minera y láctea, y su persistencia en sedimentos lacustres, evidencian una fuente antrópica relevante. En contextos similares, el Hg asociado a minería artesanal aumenta el riesgo ecológico y, en la Amazonía, su acumulación en sistemas lénticos intensifica hasta nueve veces la producción de metilmercurio (Velásquez Ramírez et al., 2020), lo que en Umayo implica riesgo biológico por bioacumulación (Kim et al., 2022; Kouame et al., 2020). El Cd, por encima del ISQG y disperso en el lago, se asocia a agricultura e industria láctea (Liu et al., 2021), patrón también reportado para Cu, Zn y As en áreas ganaderas altoandinas (Belizario et al., 2019). No obstante, a diferencia de estudios centrados en un solo medio, este trabajo demuestra la coherencia espacial de dichos aportes antrópicos entre suelos, sedimentos fluviales y lacustres, fortaleciendo la identificación de fuentes mediante el análisis conjunto de factores de enriquecimiento y técnicas multivariadas.

En suelos, As y Pb exceden límites en zonas geológicas específicas, y Cu y Zn se concentran en PS3; sus niveles elevados en sedimentos, incluido el PEL de As en PL5 y PL8–PL12, reflejan base geogénica amplificada por actividades humanas (Morales-Simfors et al., 2020; Valladares-Faundez et al., 2020; Webb et al., 2020). Ni y Co, aunque geogénicos, son redistribuidos por erosión y dinámica fluvial (Salas-Mercado, et al., 2023). El P, alto en PR3 y zonas lacustres próximas, indica aporte agrícola con riesgo de eutrofización (Salas-Mercado et al., 2022). Fe, Al y Ti dominan las matrices, con máximos en PL1 y PL2, respondiendo a patrones de sedimentación fina y actuando como elementos de referencia en EF (T. Wang et al., 2017; Yang et al., 2020).

Conclusiones

El estudio concluye que la distribución de elementos en suelos, sedimentos fluviales y lacustres de la cuenca Umayo responde a fuentes geogénicas y antrópicas. Fe, Al, Ti, Ni y Co se asocian a la litología

regional, mientras que Cu, Zn, Pb, Cd y As, con concentraciones que superan umbrales del CCME y ECA en puntos críticos, provienen de actividades agropecuarias, lácteas y posiblemente mineras. El uso combinado de valores guía, enriquecimiento geoquímico y análisis multivariado permitió diferenciar orígenes, identificar patrones de contaminación y zonas de riesgo, estableciendo una línea base integral y comparativa para sistemas altoandinos.

En este contexto, se recomienda que la información generada sea incorporada en instrumentos de gestión ambiental de la cuenca, orientados al monitoreo sistemático de sedimentos y suelos y a la prevención de aportes antrópicos de metales, con el fin de preservar la calidad ecológica del ecosistema lacustre y sustentar decisiones de manejo ambiental basadas en evidencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Altiplano por el financiamiento otorgado a través del Contrato de Financiamiento N.º 0017-2025-VRI-UNA-PUNO, en el marco del programa Financiamiento de Proyectos de Semilleros de Investigación 2024, el cual hizo posible el desarrollo y la difusión de los resultados de la presente investigación. Además, agradecer a la Dra. Marian Alicia Hermoza Gutiérrez por el apoyo logístico.

Conflicto de Intereses

Los autores no tienen conflictos de interés en la presentación y publicación de esta investigación.

Contribución de autores

Conceptualización: D.A. Salas A. (60%), P.J. Quispe A. (20%), A.S. Vargas T. (20%). *Curación de datos:* D.A. Salas A. (60%), P.J. Quispe A. (20%), S. Vargas T. (20%). *Análisis formal:* D.A. Salas A. (60%), P.J. Quispe A. (20%), S. Vargas T. (20%). *Adquisición de fondos:* D.A. Salas A. (100%). *Investigación:* D.A. Salas A., L.D. Lipa Q., K.P. Huillca C., N.M. Humala L., B.C. Leqqe V., N. Fuentes M. (16.67% cada uno). *Metodología:* D.A. Salas A. (70%), P.J. Quispe A. (30%). *Administración del proyecto:* D.A. Salas A. (100%). *Recursos:* D.A. Salas A. (60%), P.J. Quispe A. (40%). *Software:* L.D. Lipa Q., K.P. Huillca C., N.M. Humala L., B.C. Leqqe V., N. Fuentes M. (20% cada uno). *Supervisión:* D.A. Salas A. (60%), P.J. Quispe A. (20%), S. Vargas T. (20%). *Validación:* P.J. Quispe A. (50%), S. Vargas T. (50%). *Visualización:* L.D. Lipa Q., K.P. Huillca C., N.M. Humala L., B.C. Leqqe V., N. Fuentes M. (20% cada uno). *Redacción–borrador original:* L.D. Lipa Q., K.P. Huillca C., N.M. Humala L., B.C. Leqqe

V., N. Fuentes M. (20% cada uno). *Redacción–revisión y edición*: D.A. Salas A. (40%), P.J. Quispe A. (30%), S. Vargas T. (30%).

Referencias

- Ahmad, N., Singh, S. P., Sahu, S., Bhattacharyya, R., Maurya, A. S., Kumar, N., Rout, R. K., & Tripathy, G. R. (2024). Isotopic evidence of autochthonous organic matter acting as a major sink of anthropogenic heavy metals in modern lacustrine sediments. *Environmental Pollution*, 349. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123964>
- ANA. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*.
- Ateş, A., Demirel, H., Köklü, R., Çetin Doğruparmak, Ş., Altundağ, H., & Şengörür, B. (2020). Seasonal Source Apportionment of Heavy Metals and Physicochemical Parameters: A Case Study of Sapanca Lake Watershed. *Journal of Spectroscopy*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/7601590>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (1979). *Levantamiento geotécnico con fines de represamiento de la Laguna Umayo* (Vol. 0, Issue 1). <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4434>
- Belizario, G., Capacoila, J., Huaquisto, E., Cornejo, D. A., & Chui, H. N. (2019). Determinación del contenido de fósforo y arsénico, y de otros metales contaminantes de las aguas superficiales del río Coata, afluentes del Lago Titicaca, Perú. *Rev. Boliv. Quim.*, 36(5), 223–228. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.5.4>
- Bhutiani, R., Khanna, D. R., Tyagi, B., Tyagi, P., & Kulkarni, D. (2015). Assessing environmental contamination of River Ganga using correlation and multivariate analysis. *University of Tehran*, 1(3), 265–273. https://jpoll.ut.ac.ir/article_53929.html%0Ahttp://jpoll.ut.ac.ir/article_53929.html
- Cáceres Obada, M. C., Zegarra Oliveira, M. E. F., Meza Elguera, N. Y., Sosa Pulcha, S. E., Portocarrero Banda, A. A., Quispe Ortiz, J. A., Salinas Murillo, V., & Jiménez Pacheco, H. G. (2025). Assessment of heavy metal contamination in surface sediments: Seasonal influence in the Majes-Camaná basin of the Arequipa region, Peru. *Results in Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103673>
- Chirenje, T., Ma, L. Q., Reeves, M., & Szulczewski, M. (2004). Lead distribution in near-surface soils of two Florida cities: Gainesville and Miami. *Geoderma*, 119(1–2), 113–120. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00244-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00244-1)
- Correa, M., Bolaños, M., Rebolledo, E., Rubio, D., & Salinas, E. (2015). Análisis del contenido de metales en aguas, sedimentos y peces en la cuenca del río Santiago, provincia de Esmeraldas, Ecuador. *Investigaciones y Saberes*, 4(2), 32–42.
- Custodio, M., Fow, A., De la Cruz, H., Chanamé, F., & Huarcaya, J. (2023). Potential ecological risk from heavy metals in surface sediment of lotic systems in central region Peru. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1295712>
- Estándares de Calidad Ambiental Para Suelo (ECA), El Peruano (2017). http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf
- Gobierno Regional de Puno (GRP). (2015). *INFORME FINAL DEL ÁREA DE GEOLOGÍA REGIONAL PUNO*.
- Gomes, M. V. T., Costa, A. S., Garcia, C. A. B., Passos, E. A., & Do Patrocínio Hora Alves, J. (2010). Concentrações e associações geoquímicas de Pb e Zn em sedimentos do rio São Francisco impactados por rejeitos da produção industrial de zinco. *Química Nova*, 33(10), 2088–2092. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010001000016>
- Gradilla-Hernández, M. S., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., Meza-Rodríguez, D., Yebra Montes, C., & Perfecto-Avalos, Y. (2020). Multivariate water quality analysis of Lake Cajititlán, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7972-4>
- Kim, C. S., Kim, S. H., Lee, W. C., & Lee, D. H. (2022). Spatial variability of water quality and sedimentary organic matter during winter season in coastal aquaculture zone of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113991>
- Kouame, L. B. C., Bolou Bi, E. B., Aka, N., Alphonse, V., Goula, B. T. A., & Balland-Bolou-Bi, C. (2020). Seasonality of Hg dynamics in the Ebrié Lagoon (Côte d'Ivoire) ecosystem: influence of biogeochemical factors. *Environmental Science and Pollution Research*, Fiston 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08471-3>
- Liu, P., Zheng, C., Wen, M., Luo, X., Wu, Z., Liu, Y., Chai, S., & Huang, L. (2021). Ecological risk

- assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of chagan lake, northeast china. *Water (Switzerland)*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/w13070894>
- Maldonado, I., Miranda-Mamani, J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100903>
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR). (2023). *Isla Umayo*. https://consultaslinea.mincetur.gob.pe/fichaInventario/index.aspx?cod_Ficha=11802&utm_source=chatgpt.com
- Miserendino, R. A., Bergquist, B. A., Adler, S. E., Guimarães, J. R. D., Lees, P. S. J., Niquen, W., Velasquez-López, P. C., & Veiga, M. M. (2013). Challenges to measuring, monitoring, and addressing the cumulative impacts of artisanal and small-scale gold mining in Ecuador. *Resources Policy*, 38(4), 713–722. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2013.03.007>
- Morales-Simfors, N., Bundschuh, J., Herath, I., Inguaggiato, C., Caselli, A. T., Tapia, J., Choquehuayta, F. E. A., Armienta, M. A., Ormachea, M., Joseph, E., & López, D. L. (2020). Arsenic in Latin America: A critical overview on the geochemistry of arsenic originating from geothermal features and volcanic emissions for solving its environmental consequences. *Science of the Total Environment*, 716(November 2019), 135564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135564>
- Pérez-Portilla, P., Aránguiz-Acuña, A., Pizarro, H., Maldonado, A., Herrera, J., & Tapia, J. (2024). Assessing the effects of long-term mining exploitation on a lacustrine system from the arid region of the Atacama Desert, Chile. *Science of the Total Environment*, 949. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174771>
- Pesantes, A. A., Carpio, E. P., Vitvar, T., López, M. M., & Menéndez-Aguado, J. M. (2019). A multi-index analysis approach to heavy metal pollution assessment in river sediments in the Ponce Enríquez Area, Ecuador. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030590>
- Quino Lima, I., Ramos Ramos, O. E., Ormachea Muñoz, M., Chambi Tapia, M. I., Quintanilla Aguirre, J., Ahmad, A., Maity, J. P., Islam, M. T., & Bhattacharya, P. (2021). Geochemical mechanisms of natural arsenic mobility in the hydrogeologic system of lower Katari Basin, Bolivian Altiplano. *Journal of Hydrology*, 594. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125778>
- Rivera, C. A., Letelier, J. A., Acevedo, B., Tobar, T. D. P., Torres, C. L., Cataldo, A. M., Rudolph, A., & Rivera, M. Á. (2020). Calidad del agua del estero El Sauce, Valparaíso, Chile Central. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 261–273. <https://doi.org/10.20937/rica.53465>
- Rydberg, J., Rosén, P., Lambertsson, L., De Vleeschouwer, F., Tomasdotter, S., & Bindler, R. (2012). Assessment of the spatial distributions of total-and methyl-mercury and their relationship to sediment geochemistry from a whole-lake perspective. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences*, 117(4), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2012JG001992>
- Salas-ávila, D. (2021). *Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados a la calidad del agua en el río Suches*, *Evaluation of heavy metals and social behavior associated a the water quality in the Suches River* . 0, 1–34. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-04>
- Salas-Mercado, D., Belizario-Quispe, G., & Horna-Muñoz, D. (2023). Heavy Metal Pollution Assessment in Lake Rinconada in the Southern Andes, Peru. *Pollution*, 9(2), 477–493. <https://doi.org/http://doi.org/10.22059/POLL.2022.346689.1558>
- Salas-Mercado, D., Hermoza-Gutierrez, M., Belizario-Quispe, G., Chaiña, F., Quispe, E., & Salas-Ávila, D. (2022). Geochemical Indices for the Assessment of Chemical Contamination Elements in Sediments of the Suches River , Peru. *Pollution*, 8(2), 595–610. <https://doi.org/810.22059/POLL.2021.331806.1205>
- Salas-Mercado, D., Hermoza-Gutiérrez, M., Chaiña-Chura, F., Huaquisto-Cáceres, S., Hurtado-Chávez, E., Rojas-Chahuares, F., Quispe-Mamani, E., Salas-Ávila, D., & Belizario-Quispe, G. (2023). EVALUATION OF THE SEDIMENT QUALITY OF THE SUCHES RIVER USING MULTIVARIATE ANALYSIS METHODS. *Revista Boliviana de Química*, 40(2). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.2.2>
- Salas-Mercado, D., Hermoza-Gutiérrez, M., & Salas-Ávila, D. (2020). Distribution of heavy metals and metaloids in surface waters and on

- sediments of the crucero river, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 37(4), 185–193. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.4.1>
- Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, 4 (1998).
- Sepúlveda, L. D., Lecomte, K. L., Pasquini, A. I., Mansilla, E. G., & Chaparro, M. A. E. (2019). Propiedades geoquímicas y magnéticas de sedimentos como indicadores de contaminación. Caso de estudio: Río Suquia, Córdoba, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(2), 183–194. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.2.1037>
- Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. In *Cases and solutions Environmental Geology* (Vol. 39, Issue 6). Springer-Verlag.
- Swarnalatha, K., Letha, J., Ayoob, S., & Nair, A. G. (2015). Risk assessment of heavy metal contamination in sediments of a tropical lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4558-7>
- Taheri Tizro, A., Voudouris, K., & Vahedi, S. (2014). Spatial Variation of Groundwater Quality Parameters: A Case Study from a Semiarid Region of Iran. *International Bulletin of Water Resources & Development (IBWRD)*, 03.
- Tapia, J., Murray, J., Ormachea, M., Tirado, N., & Nordstrom, D. K. (2019). Origin, distribution, and geochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna plateau of Argentina, Bolivia, Chile, and Perú. *Science of the Total Environment*, 678, 309–325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.084>
- Ticona Carrizales, L., Ferró-Gonzales, P. F., Apaza-Panca, C. M., Parillo Sosa, E. G., Yapuchura Saico, C. R., & Rodríguez Chokewanca, I. R. (2021). Evaluation of environmental parameters in the Espinar Puno stabilization lagoon. *Heliyon*, 7(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06959>
- Valladares-Faundez, P., Cáceres, G., & Valdés, J. (2020). Contenido de plomo, cadmio y arsénico en tejidos biológicos de la paloma común (Columba livia) presentes en un área urbana previamente contaminada con residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 485–490. <https://doi.org/10.20937/rica.53323>
- Velásquez Ramírez, M. G., Barrantes, J. A. G., Thomas, E., Gamarra Miranda, L. A., Pillaca, M., Tello Peramas, L. D., & Bazán Tapia, L. R. (2020). Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazon. *Catena*, 189(May 2019), 104454. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104454>
- Wang, K., Aji, D., Li, P., & Hu, C. (2024). Characterization of heavy metal contamination in wetland sediments of Bosten lake and evaluation of potential ecological risk, China. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1398849>
- Wang, L. F., Yang, L. Y., Kong, L. H., Li, S., Zhu, J. R., & 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., & 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>
- Webb, N. P., Kachergis, E., Miller, S. W., McCord, S. E., Bestelmeyer, B. T., Brown, J. R., Chappell, A., Edwards, B. L., Herrick, J. E., Karl, J. W., Leys, J. F., Metz, L. J., Smarik, S., Tatarko, J., Van Zee, J. W., & Zwicke, G. (2020). Indicators and benchmarks for wind erosion monitoring, assessment and management. *Ecological Indicators*, 110(August 2019), 105881. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105881>
- Yacoub, C., Miralles, N., & Valderrama, C. (2015). Experimental Study of Mobility and Kinetic Characterization of Trace Elements in Contaminated Sediments from a River Basin in Northern Peru. *Human and Ecological Risk Assessment*, 21(3), 828–844. <https://doi.org/10.1080/10807039.2014.939571>
- Yang, H. J., Jeong, H. J., Bong, K. M., Jin, D. R., Kang, T. W., Ryu, H. S., Han, J. H., Yang, W. J., Jung, H., Hwang, S. H., & Na, E. H. (2020). Organic matter and heavy metal in river sediments of southwestern coastal Korea: Spatial distributions, pollution, and ecological risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 159(July), 111466. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111466>
- Yuan, P., Wu, X., Xia, Y., Peng, C., Tong, H., Liu, J., Jiang, L., & Wang, X. (2020). Spatial and seasonal variations and risk assessment for heavy metals in surface sediments of the largest river-embedded reservoir in China. *Environmental Science and*

Pollution Research, 27(28), 35556–35566. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09868-w>

Zingaro, M., Refice, A., Giachetta, E., D'Addabbo, A., Lovergine, F., De Pasquale, V., Pepe, G.,

Brandolini, P., Cevasco, A., & Capolongo, D. (2019). Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. *Science of the Total Environment*, 672, 763–775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.461>