DOI: 10.24850/j-tyca-2026-06-02

Artículos

Ecotoxicidad y riesgo ambiental de elutriados de sedimentos en un tramo del río Ocoña, en el sur del Perú

Ecotoxicity and environmental risk of sediment elutriates in a section of the Ocoña River, southern Peru

Juleysi Virrueta-Chavez[1], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5910-7468

Armando Arenazas-Rodriguez[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0940-2204

[1]Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Facultad de Ciencias Biológicas, Arequipa, Perú, jvirruetac@unsa.edu.pe

[2]Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Facultad de Ciencias Biológicas, Arequipa, Perú, aarenazas@unsa.edu.pe

Autora para correspondencia: Juleysi Virrueta-Chavez, jvirruetac@unsa.edu.pe

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Resumen

En los ríos, los sedimentos funcionan como almacén de contaminantes, sobre todo de metales, que pueden liberarse y afectar a los organismos acuáticos. El presente estudio evaluó la ecotoxicidad de los elutriados de sedimentos obtenidos de tres puntos de muestreo (Secocha-PE1, Infiernillo-PE2 y Urasqui-PE3) en la cuenca del río Ocoña de Arequipa, Perú, durante 2024, con el objetivo de determinar su impacto sobre organismos de tres niveles tróficos: *Lemna minor*, *Daphnia magna* y *Poecilia reticulata*. Se evaluaron las concentraciones de metales presentes en el sedimento obtenido de los tres puntos de muestreo, destacando arsénico y bario, pero no excediendo la línea guía sobre la calidad de sedimentos para la protección de vida acuática (ISQG Canadá). Se realizaron bioensayos con cuatro diluciones de elutriados obtenidos de los sedimentos (12.5, 25, 50 y 100 %) y un tratamiento de control libre de elutriado. Los bioensayos evidenciaron en *Lemna minor* inhibición en el crecimiento, que fue proporcional a las diluciones del elutriado principalmente en PE1; *Daphnia magna* fue el organismo más sensible, registrando 93.33 ± 11.55 % de mortalidad y una CL_{50} de 25.05 %, con el tratamiento mayor (100 %) en PE1. *Poecilia reticulata* mostró baja mortalidad, pero se observaron efectos subletales. El riesgo ambiental evidencia toxicidad variada, pero considerando la supervivencia de los organismos, PE1 fue el sitio más impactado y posee una valoración de altamente tóxico, principalmente para *D. magna*. Se recomienda la implementación de programas de monitoreo continuo de metales en el río Ocoña.

Palabras clave: contaminación del agua, contaminante, vigilancia ambiental, animal acuático, plantas acuáticas, pez, río, cuenca, Perú.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Abstract

In rivers, sediments act as a repository for contaminants, especially metals, which can be released and affect aquatic organisms. This study evaluated the ecotoxicity of sediment elutriates obtained from three sampling points (Secocha-PE1, Infiernillo-PE2, and Urasqui-PE3) in the Ocoña River basin of Arequipa, Peru, during 2024. The objective was to determine their impact on organisms at three trophic levels: *Lemna minor*, *Daphnia magna*, and *Poecilia reticulata*. Metal concentrations in the sediment obtained from the three sampling points were evaluated, with arsenic and barium being the most notable, but not exceeding the sediment quality guidelines for the protection of aquatic life (ISQG Canada). Bioassays were performed with four dilutions of elutriates obtained from the sediments (12.5, 25, 50, and 100 %) and a control treatment free of elutriate. The bioassays showed growth inhibition in *Lemna minor*, which was proportional to the elutriate dilutions, mainly in PE1; *Daphnia magna* was the most sensitive organism, recording 93.33 ± 11.55 % mortality and an LC_{50} of 25.05 %, with the highest treatment (100 %) in PE1. *Poecilia reticulata* showed low mortality, but sublethal effects were observed. The environmental risk evidences varied toxicity, but considering the survival of the organisms, PE1 was the most impacted site and has a highly toxic rating, mainly for *D. magna*. The implementation of continuous metal monitoring programs in the Ocoña River is recommended.

Keywords: Water pollution, pollutants, environmental monitoring, aquatic animals, aquatic plants, fish, rivers, basins, Peru.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Recibido: 17/10/2025

Aceptado: 23/02/2026

Publicado *ahead of print*: 17/03/2026

Versión final: 01/11/2026

Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo sostenible, cuya gestión debe garantizar su conservación y uso responsable. Sin embargo, su calidad se ve comprometida por el crecimiento poblacional y diversas actividades humanas, entre ellas la agricultura, la industria y, en especial, la minería, que genera descargas líquidas y sólidas capaces de alterar los ecosistemas acuáticos (ANA, 2018; Paccara, 2019). La acumulación de contaminantes en los cuerpos hídricos conlleva riesgos para la salud pública y el equilibrio ecológico, siendo los metales pesados uno de los principales problemas debido a su persistencia, bioacumulación e impacto en la cadena trófica (Londoño-Franco *et al*., 2016; Gaibor *et al*., 2024).

En las cuencas del sur del Perú, la contaminación de aguas superficiales por descargas antrópicas y presencia de metales pesados es motivo de creciente preocupación (Ccanccapa-Cartagena *et al*., 2023). Si bien en Arequipa, Perú, existen estudios sobre escorrentías urbanas y embalses como Aguada Blanca (Torres-Espirilla & Paredes-de-Gómez, 2022), aún se presentan vacíos respecto al estado ecotoxicológico de ríos de la cuenca sur como el Ocoña.

El análisis ecotoxicológico constituye una herramienta eficaz para estimar los riesgos de los contaminantes sobre organismos y ecosistemas. Los bioensayos permiten determinar la toxicidad de diversas sustancias

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

bajo condiciones controladas mediante indicadores como la concentración o dosis letal media (CL_{50}, DL_{50}) o efectos subletales, convirtiéndose en una alternativa económica y confiable para el monitoreo ambiental (Iannacone & Alvariño, 2007; Persoone *et al*., 2003). Su aplicación con especies sensibles, llamados también organismos indicadores, de diferentes niveles tróficos, como peces, crustáceos y plantas acuáticas, ha demostrado utilidad en diversos escenarios; la exposición de estos organismos a metales pesados puede generar alteraciones en procesos vitales, como el crecimiento, la reproducción y el comportamiento (Siqueira-Caixeta *et al*., 2022; Park *et al*., 2025).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la ecotoxicidad de elutriados obtenidos de sedimentos del río Ocoña, en la región Arequipa, Perú, durante 2024, empleando como bioindicadores *Lemna minor*, *Daphnia magna* y *Poecilia reticulata.*

Materiales y métodos

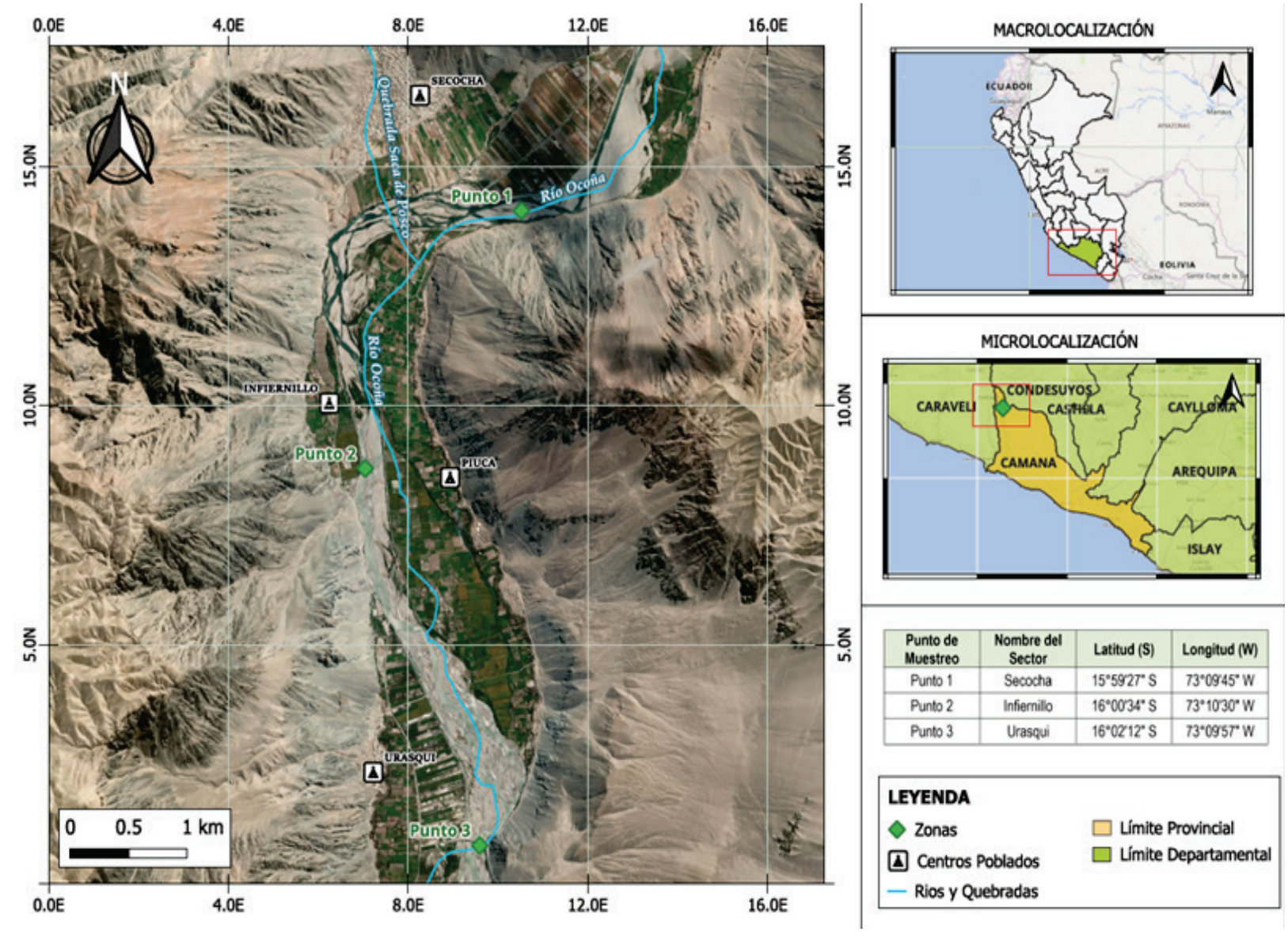
Se desarrolló un estudio experimental de nivel básico. La investigación se centró en la cuenca media y baja del río Ocoña en la región de Arequipa, Perú. Se seleccionaron tres puntos de muestreo (Figura 1) en función de la cercanía a fuentes de contaminación, variaciones fisicoquímicas (conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y principalmente el pH), accesibilidad y representatividad, en los sectores de Secocha (PE1), cercano a relaves de minería artesanal e ilegal (entre 100 y 800 m), residuos de la agricultura, aguas residuales y residuos sólidos de la población; Infiernillo (PE2), con fuentes contaminantes entre 50 y 70 m de distancia de este punto, con residuos químicos (aguas residuales

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

domésticas) agrícolas y residuos sólidos (escombros); y finalmente el sector de Urasqui (PE3), con similares fuentes de contaminación a los anteriores puntos, con una distancia entre 50 y 200 m del río, donde destacan pozos de aguas residuales sin revestimiento. La distancia entre los puntos de toma de muestra se encuentra entre 2 y 3 kilómetros aproximadamente. Considerando el descenso estacional del caudal del río Ocoña en la época seca (octubre-noviembre), se colectaron muestras de sedimentos utilizando recipientes de polietileno de alta densidad (5 gal), previamente lavados con detergente neutro y agua destilada, posteriormente esterilizados con una solución de hipoclorito de sodio 0.5 % durante 30 minutos (Alejos *et al*., 2021); las muestras se transportaron refrigeradas a 4 ± 0.5 °C al laboratorio de Acuicultura de la Escuela Profesional de Ingeniería Pesquera de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. La evaluación de metales se hizo en un laboratorio acreditado. La obtención de elutriados fue mediante el método modificado descrito por USEPA (2001); se mezclaron 200 g de sedimento húmedo con 800 ml de agua declorinada; luego se dejó reposar por 24 horas a 4 °C; se centrifugó a 250 rpm durante 30 min, decantados por 12 horas en oscuridad y filtrados con papel Whatman. El resultado se almacenó a 4 °C hasta su posterior uso.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates



Punto de Muestreo	Nombre del Sector	Latitud (S)	Longitud (W)
Punto 1	Secocha	15°59'27" S	73°09'45" W
Punto 2	Infiernillo	16°00'34" S	73°10'30" W
Punto 3	Urasqui	16°02'12" S	73°09'57" W

Figura 1. Ubicación geográfica de los puntos de toma de muestras en la cuenca del río Ocoña, Arequipa, Perú.

Se emplearon como organismos modelo *Lemna minor*, *Daphnia magna* (neonatos < 24 h) y *Poecilia reticulata* (peces juveniles machos). Los organismos fueron aclimatados previamente bajo condiciones

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

controladas (22 ± 0.5 °C y humedad al 40 %) en el laboratorio (OECD, 2006).

Se evaluaron cuatro diluciones (12.5, 25, 50 y 100 %) de elutriados obtenidos de los sedimentos, y un tratamiento control con agua declorinada. Los ejemplares de *Lemna minor* se colocaron en recipientes plásticos de 250 ml de capacidad, 10 colonias (dos frondas cada una) por réplica (3) con 100 ml de cada dilución, con iluminación constante (6 500 lux), durante siete días; se evaluó crecimiento (número de frondas), y peso seco y húmedo al final de la exposición (OECD, 2006). Con *Daphnia magna* se realizaron ensayos agudos de 48 h con 10 neonatos por réplica (3) en placas Petri con 20 ml de dilución de cada tratamiento; se evaluó la falta de movilidad (durante 15 s) como criterio de mortalidad (OECD, 2018). En cuanto a *Poecilia reticulata*, se realizaron ensayos agudos de 96 h con cinco peces por réplica (2) en acuarios de 4 l de cada tratamiento (dilución). Se registraron mortalidad y efectos subletales, reacción anormal e hiperventilación (OECD, 2019). Los resultados se expresaron como CL_{50} e índices ecotóxicos LOEC y NOEC; además, se determinó el riesgo ambiental calculando las unidades de toxicidad aguda (UTa) de acuerdo con la siguiente relación $UTa = (1/CL_{50}) * 100$ (Persoone *et al*., 2003), cuya clasificación de toxicidad es "muy tóxico" (UTa > 4 y CL_{50} < 25 %); "tóxico" (UTa entre 2 y 4, y CL_{50} entre 25 y 50 %); "moderadamente tóxico" (UTa entre 1.33 y 1.99, y CL_{50} entre 50 y 75 %), y "ligeramente tóxico" (UTa < 1.33 y CL_{50} > 75 %).

El estado ecotoxicológico se determinó con base en el porcentaje de supervivencia y los rangos de toxicidad aguda propuestos por Roig *et al*. (2015) y Tejada-Meza *et al*. (2023): "altamente tóxico" (CL_{50} < 10 y % de supervivencia < 10); "moderadamente tóxico" (CL_{50} entre 20 y 10, y

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

% de supervivencia entre 10 y 20); "marginalmente tóxico" (CL_{50} entre 60 y 21, y % de supervivencia entre 21 y 50); "ligeramente tóxico" (CL_{50} entre 61 y 100, y % de supervivencia entre 50 y 80), y "no tóxico" (CL_{50} > 100 y % de supervivencia > 80).

Se aplicó un diseño de bloques completos al azar (DBCA). Las diferencias significativas se analizaron mediante ANOVA, seguido de la prueba de Tukey (a = 0.05), donde se hallaron las diferencias entre las dosis evaluadas (SIG 1) y puntos de muestreo (SIG 2). Los análisis se realizaron con *Statistica* v.12 y las figuras con *Sigmaplot* v.14.

Resultados

Los resultados se presentan en figuras y tablas organizadas según cada bioindicador utilizado. En todos los casos se evaluaron los efectos ocasionados por distintas diluciones de elutriados derivados de sedimentos del río Ocoña. Asimismo, se muestran tablas con los valores del cociente de riesgo y la clasificación del estado ecotoxicológico correspondiente a la máxima dilución de exposición ensayada.

La Tabla 1 muestra los resultados de la evaluación de los sedimentos en los tres puntos de muestreo. En todos los casos los valores no superan a los establecidos en Línea Guía sobre la Calidad de Sedimentos para la Protección de Vida Acuática (ISQG), de las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental (CCME, 2001). Se puede destacar al arsénico y bario, donde el primero expresa el valor más elevado (1.95 mg/kg) en la zona de Urasqui (PE3) y el bario, en el mismo sector, muestra 72.77 mg/kg; ambos valores difieren notoriamente con respecto a los otros dos sectores (Secocha e Infiernillo) evaluados.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 1. Evaluación de sedimentos en tres zonas del río Ocoña en la región de Arequipa, Perú.

Ensayo	Unidad	Zonas			ISQG* mg/kg
		PE1 Secocha	PE2 Infiernillo	PE3 Urasqui	
Cianuro libre	mg CN-/kg MS	< 0.5	< 0.5	< 0.5	----
Metales totales ICP-MS					
Arsénico	mg/kg	0.79	0.49	1.95	5.9
Bario	mg/kg	55.72	46.75	72.77	----
Cadmio	mg/kg	< 0.020	< 0.020	< 0.020	0.6
Cromo	mg/kg	< 0.03	< 0.03	< 0.03	37.3
Mercurio	mg/kg	< 0.04	< 0.04	< 0.04	0.17
Plomo	mg/kg	< 0.20	< 0.20	< 0.20	35.0

*ISQG: directrices provisionales sobre la calidad de los sedimentos de agua dulce.

En la evaluación de número de frondas, peso fresco y seco en *Lemna minor* por efecto del elutriado de sedimento de los puntos de muestreo (Figura 2) se observan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en los tres parámetros evaluados; la zona más alejada en la cuenca PE1 (Secocha) es la que expresa valores que fueron disminuyendo a medida que la concentración de elutriado era más alta en todos los efectos, destacando el tratamiento de elutriado al 100 %, que mostró en esta zona los valores más bajos con 20.00 ± 1.00, 0.16 ± 0.06 mg y 0.08 ± 0.03 mg, para número de frondas, peso fresco y seco, respectivamente, en relación con los demás puntos de muestreo. La LOEC calculada fue 12.5 % y una NOEC menor a 12.5 % de dilución de elutriado en los tres puntos de muestreo.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

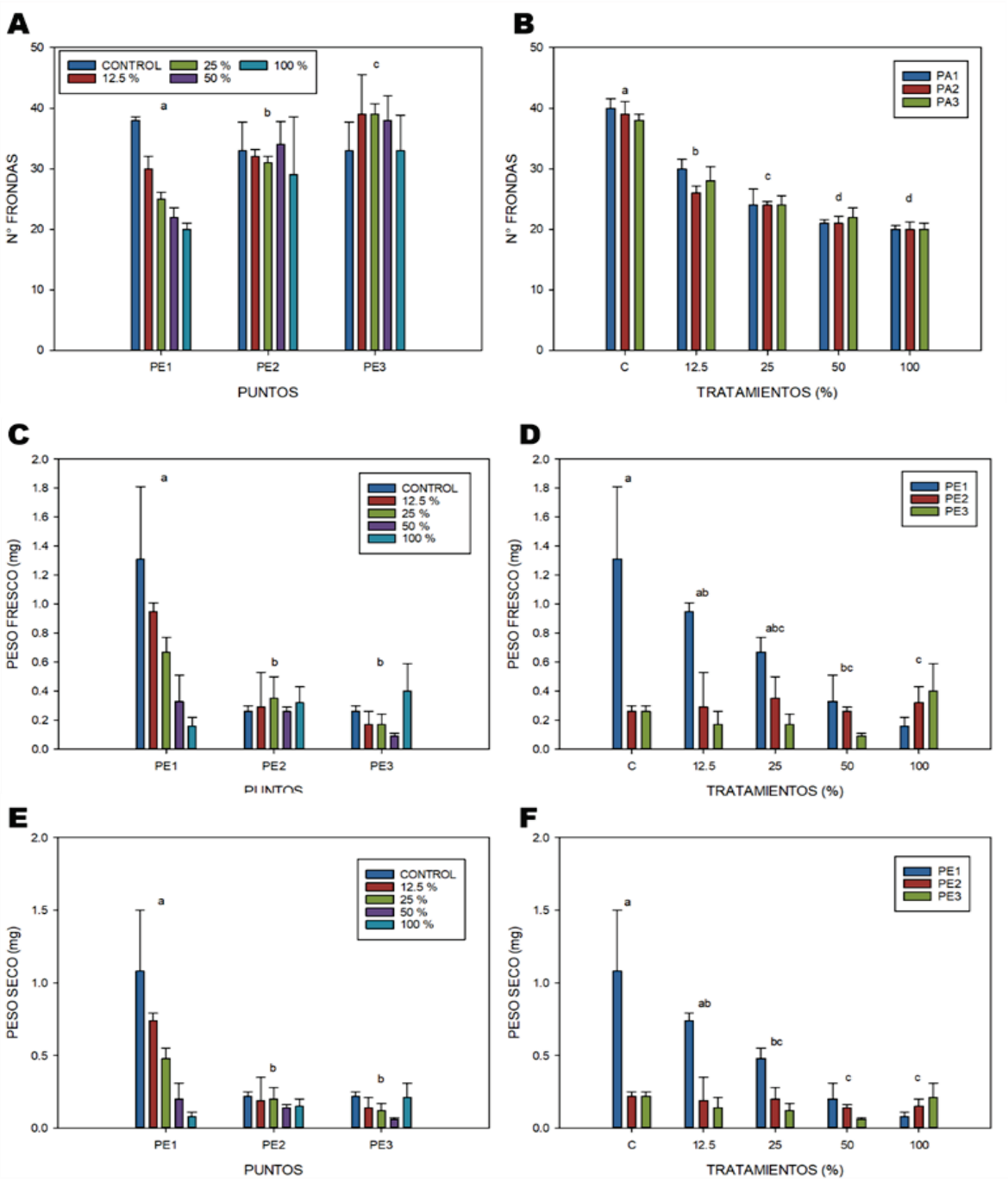


Figura 2. Efectos de la exposición (168 h) de cuatro diluciones de elutriados de sedimentos de tres puntos de muestreo del río Ocoña en *Lemna minor*.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

La mortalidad a las 48 horas de *Daphnia magna* por efecto del elutriado del sedimento obtenido de los tres puntos de muestreo (Figura 3) muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los puntos de muestro de la cuenca del río Ocoña; sin embargo, se obtuvo una elevada mortalidad en el tratamiento de 100 % de elutriado en PE1 (Secocha), con un valor de 93.33 ± 11.55 % con respecto a las demás zonas. El valor de la CL_{50} en las tres zonas de muestreo oscila entre 22 y 25 % de elutriado y la LOEC fue de 12.5 %.

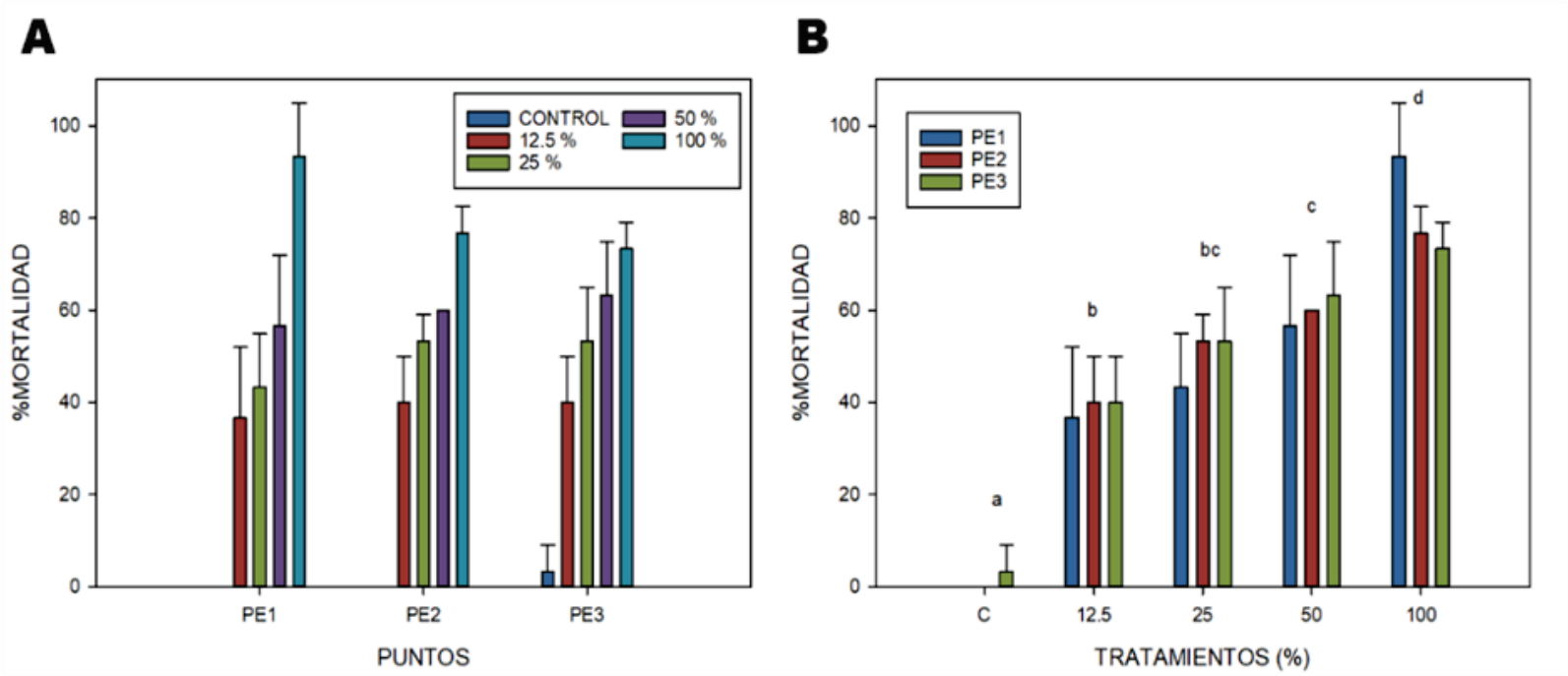


Figura 3. Mortalidad de *Daphnia magna* por exposición (48 h) de cuatro diluciones de elutriados de sedimentos de tres puntos de muestreo del río Ocoña.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La Figura 4 muestra los efectos de los elutriados sobre el pez *Poecilia reticulata*. Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los puntos de muestreo en los efectos de mortalidad y reacción anormal; en general, se observa un incremento de los efectos proporcional a las dosis (diluciones); además, se destacan los resultados del tratamiento de 100 % de elutriado en Secocha (PE1) y del punto Infiernillo (PE2), con mortalidad de 90.00 ± 14.14 y 70.00 ± 14.14 %, respectivamente; asimismo, PE3 (Urasqui) expresó mortalidad baja (20.0 %) en cuanto a las otras zonas de trabajo; resultados similares se evidencian con valores elevados de efectos subletales en las zonas PE1 y PE2, en comparación con Urasqui (PE3). La LOEC general hallada fue de 100, 25 y 12.5 % para cada uno de los efectos evaluados, respectivamente, y la CL_{50} se calculó en solo PE1 y PE2 con valores relativamente altos de 62.99 y 84.41 %, respectivamente. La CL_{50} de la zona PE2 (Infiernillo) corresponde a 84.41 %, infiriendo elevada toxicidad del elutriado para los peces en dicha zona en relación con las demás áreas.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

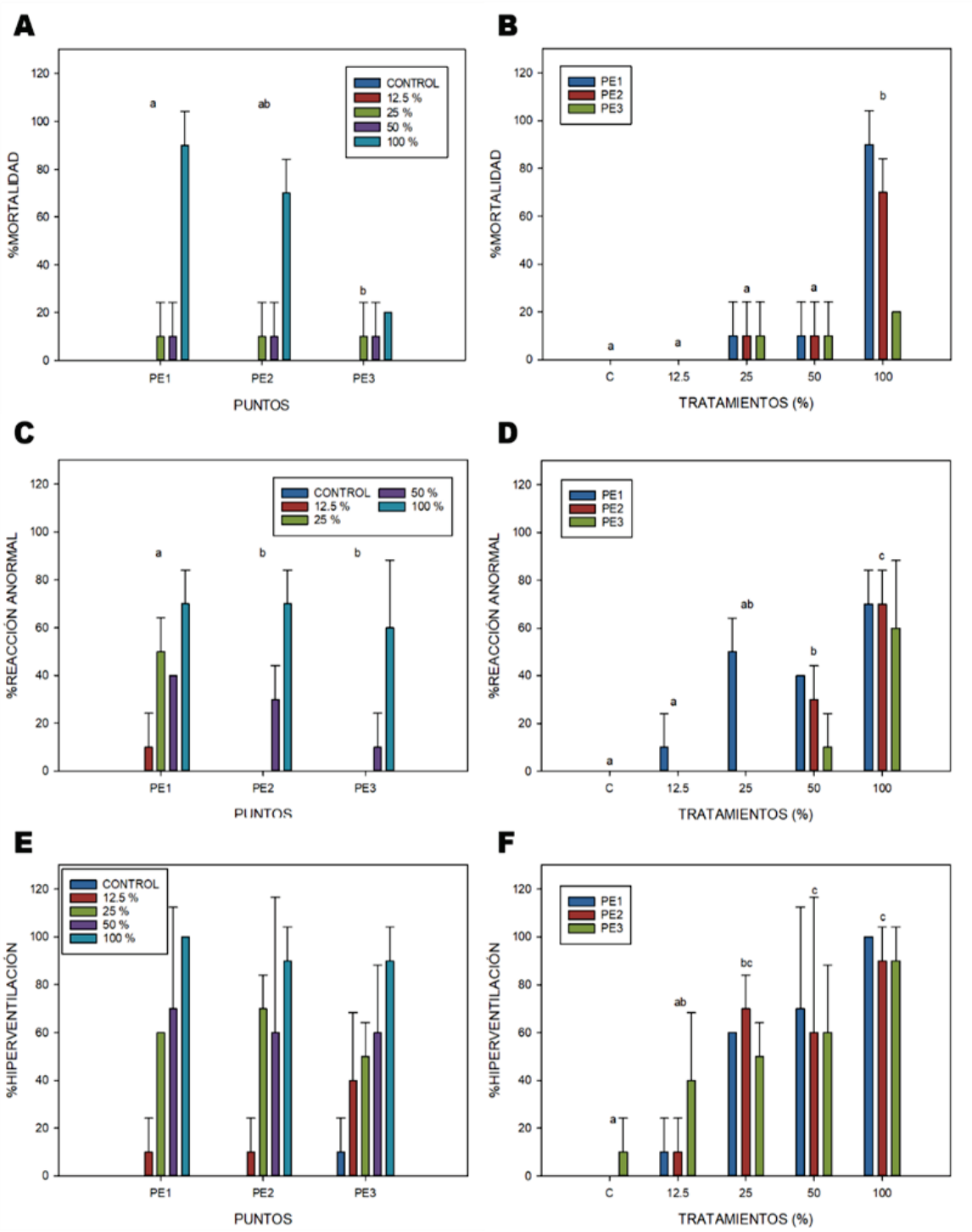


Figura 4. Mortalidad y efectos subletales en *Poecilia reticulata* por la exposición (96 h) de cuatro diluciones de elutriados de sedimentos de tres puntos de muestreo del río Ocoña.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La Tabla 2 resume el riesgo ambiental del elutriado en los organismos de prueba *D. magna* y *P. reticulata* a través de las unidades de toxicidad aguda (UTa) y el estado ecotoxicológico (EE). Cabe indicar que en este último el procesamiento se ha realizado solo de los resultados del tratamiento mayor de exposición, es decir del 100 % del elutriado de sedimentos y el porcentaje de supervivencia en los organismos; en cuanto a *L. minor*, no se calculó el riesgo debido a la ausencia de mortalidad de los especímenes. Se observa que de acuerdo con la clasificación de las UTa, el elutriado en los tres sectores resultó ser tóxico y muy tóxico para *D. magna*, y moderadamente tóxico para *P. reticulata*; respuesta similar se obtiene en los resultados del estado ecotoxicológico (EE), donde también el organismo más afectado es *D. magna*, en específico por la toxicidad del elutriado del punto Secocha (PE1), considerado como altamente tóxico con respecto a los demás puntos de muestreo.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 2. Evaluación del riesgo ambiental: unidades de toxicidad aguda (UTa) y estado ecotoxicológico (EE) de elutriados de sedimentos de tres puntos de muestreo del río Ocoña y dos organismos modelo.

Zona	Especie	TE(h)	CL_{50}	UTa	C-UTa	% S	C-EE
PE1	*D. magna*	48	25.05	3.99	Tóxico	6.67	Altamente tóxico
	P. reticulata	96	62.99	1.59	Moderadamente tóxico	10.00	Moderadamente tóxico
PE2	*D. magna*	48	22.57	4.43	Muy tóxico	23.34	Marginalmente tóxico
	P. reticulata	96	84.41	1.18	Moderadamente tóxico	30.00	Marginalmente tóxico
PE3	*D. magna*	48	22.06	4.53	Muy tóxico	26.67	Marginalmente tóxico
	P. reticulata	96	--	--	--	80.00	Ligeramente tóxico

TE(h) = tiempo de exposición en horas.
CL_{50} = dosis letal media.
Uta = unidades de toxicidad aguda.
C-Uta = clasificación Uta.
%S = porcentaje de supervivencia.
C-EE = clasificación estado ecotoxicológico.

Discusión

Los resultados del presente estudio muestran que aunque los valores de metales evaluados en sedimento de tres zonas a lo largo del río Ocoña se encuentran dentro de los límites establecidos según la Línea Guía sobre la Calidad de Sedimentos para la Protección de Vida Acuática (ISQG) de las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental, las concentraciones de arsénico (1.95 mg/kg) y bario (72.77 mg/kg) destacan en los tres puntos

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de monitoreo, considerándose entonces como zonas probables de afectación a la biota por la cantidad de metales y metaloides en sus sedimentos liberados en los elutriados; cabe indicar que estudios en la región centro sur del Perú advierten la presencia de arsénico, bario, boro, sodio. y que a pesar de que se encuentran dentro de los rangos permitidos, su coocurrencia y persistencia con concentraciones elevadas podría representar un riesgo para la calidad del agua y la biota acuática a largo plazo (Loayza, 2025).

El impacto medioambiental de la industria minera (presente en la cuenca del río Ocoña) genera posibles contaminantes que inciden en el agua y el aire. En el entorno natural, los excesos pueden surgir debido a los drenajes de agua, deslaves o relaves de las minas. Algunos metales, como el cadmio y mercurio, y metaloides como el antimonio o arsénico, que son encontrados con frecuencia en cantidades reducidas en depósitos metálicos, son extremadamente tóxicos en cantidades reducidas, sobre todo en su forma soluble, que puede ser asimilada por los seres vivos (Loayza, 2025). Esto confirma el papel de los sedimentos como sumideros de contaminantes y, a la vez, como fuentes potenciales de liberación bajo condiciones de cambio. Investigaciones en cuencas altoandinas han evidenciado que los sedimentos almacenan metales en fracciones biodisponibles que representan riesgos ecotoxicológicos importantes (Arenazas-Rodriguez *et al*., 2023; Moreno-Aguirre *et al*., 2024). El arsénico, que puede tener origen geogénico y antrópico, presenta alta toxicidad cuando se encuentra en forma inorgánica (Byeon *et al*., 2021), y su acumulación en sedimentos y suelos ocurre en particular a través de la adsorción, coprecipitación e incorporación a estructuras cristalinas minerales, formando fases relativamente insolubles que luego pueden liberarse en condiciones ambientales cambiantes (Xue *et al*., 2019).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Además, estudios locales son similares a nuestra investigación, como el de Choque y Estremadoyro (2024), quienes evaluaron el sedimento del río Piñog Condesuyos-Arequipa, y según las regulaciones canadienses determinaron que el arsénico en la estación seca elevó sus niveles, lo que se reflejó con frecuencia en efectos biológicos adversos.

Los resultados en la literatura sugieren que la especiación del metaloide arsénico juega un papel crítico en la toxicidad en el ambiente acuático y en su biodisponibilidad. Además de la toxicidad variable, según la especiación de este metaloide en el medio acuático, las formas inorgánicas del arsénico se asocian con una toxicidad más fuerte en comparación con las formas orgánicas (Méniz-Oshiro & Iannacone, 2023).

Lemna minor presentó reducciones significativas en número de frondas y biomasa a partir del tratamiento de 50 % de dilución de elutriados; este efecto puede deberse a la combinación de sales y nutrientes presentes que, en conjunto con la alcalinidad, afectan su fotosíntesis y absorción de nutrientes (Sackey *et al*., 2020); además, la presencia de arsénico podría haber generado alteraciones en los tilacoides y fotosistemas, reduciendo la síntesis de clorofila; por lo tanto, la acumulación de especies oxígeno reactivas (ROS) y peroxidación lipídica en *L. minor* (Yildiztugay *et al*., 2023; Zaidi *et al*., 2024) más la presencia de bario —que por antecedentes en organismos acuáticos como microalgas afectan la productividad primaria en ecosistemas de agua dulce y a otros organismos que se encuentran por encima de ellas en las redes tróficas (Willems *et al*., 2025)— corrobora el hecho de la reducción de crecimiento y desarrollo de las lentejas de agua, tal como se evidenció en la presente investigación.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El patrón de respuesta observado confirma que los elutriados de sedimentos representan un escenario importante de riesgo por la liberación directa de contaminantes acumulados hacia el agua.

En el caso de *Daphnia magna*, se presentaron los valores más altos de mortalidad por efecto del elutriado, específicamente en PE1 (Secocha), alcanzando hasta 93.33 ± 11.55 % con el tratamiento 100 % de elutriado y una CL_{50} que fluctuó entre 22 y 25 % en los tres puntos de muestreo; resultados que confirman la alta sensibilidad y eficacia de este invertebrado como organismo modelo para detectar efectos agudos y crónicos (Wang *et al*., 2018; Cojocaru *et al*., 2025). La elevada mortalidad podría deberse a la presencia de contaminantes liberados desde los sedimentos, como el bario y el arsénico; este último puede ejercer su toxicidad debido a su variada dinámica en el agua de acuerdo con el tipo de fuente, el estado de oxidación, las características geológicas y otras fuentes antrópicas; asimismo, este metaloide puede llegar a los cuerpos de agua por medio de algunas fuentes antrópicas como la minería, los procesos industriales y la fundición de metales; además sufre de reacciones de oxidación, reducción, metilación, desmetilación y precipitación regresando al suelo y a los sedimentos de distintas formas, entre ellas el arsenito (González-Martínez *et al*., 2024), que en su estado inorgánico trivalente se considera como la forma más tóxica al que los organismos de agua dulce pueden estar expuestos (Lee *et al*., 2020), incluso en bajas concentraciones (Czub *et al*., 2021).

En *Poecilia reticulata*, la exposición a elutriados concentrados provocó efectos subletales, como hiperventilación y comportamientos erráticos o reacciones anormales, consistentes con las alteraciones fisiológicas reportadas en peces expuestos a contaminantes disueltos

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(Authman *et al*., 2015; Huaranga *et al*., 2023). Si bien la mortalidad fue baja, la presencia de estos efectos sugiere que la exposición continua podría comprometer funciones vitales, como la respiración y el metabolismo.

Los bioensayos mostraron sensibilidades distintas según el bioindicador; en este caso, las pulgas de agua y los peces mostraron efectos derivados, probablemente, de las elevadas concentraciones de bario en los sedimentos y, por ende, en los elutriados. Estas concentraciones, en el escenario de la cuenca del río Ocoña, pueden estar asociadas con descargas agrícolas, industriales y mineras, que provocan efectos nocivos en la biota acuática, pues se conoce que el bario es un elemento antagonista fisiológico del potasio (K^+), que de forma disuelta bloquea los canales de K^+ de la bomba (Na^+, K^+)-ATPasa en las membranas celulares de los organismos. Esto resulta en una reducción de la excitabilidad de las fibras musculares, lo que puede causar parálisis muscular y muerte (Oskarsson, 2015; Verbruggen *et al*., 2020; Willems *et al*., 2025); efectos similares explicarían los efectos letales y subletales observados en los organismos de prueba, en particular en las pulgas de agua y los peces en la presente investigación.

La comparación con estudios previos en cuencas altoandinas (Perú) muestran que aunque el río Ocoña presenta menor contaminación que otras zonas mineras intensivas, las condiciones actuales generan efectos biológicos acumulativos y subletales (Mamani *et al*., 2021). Incluso contaminaciones moderadas, como las aquí registradas, pueden comprometer la integridad ecológica a largo plazo, en especial si no se implementan medidas de mitigación.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En síntesis, la cuenca del río Ocoña presenta presiones ambientales de origen antrópico asociadas con la agricultura, industria y actividades mineras que, aunque no alcanzan niveles extremos de contaminación, representan una amenaza ecológica de moderada a alta, lo cual evidencia que es necesario implementar un monitoreo continuo que integre análisis de sedimentos con parámetros fisicoquímicos, de metales y evaluaciones ecotoxicológicas multiespecie para prevenir impactos irreversibles en la biota acuática del río Ocoña, tan importante en la cuenca del sur del Perú.

Los elutriados evaluados resultan ser en términos generales de importante riesgo ambiental por su origen, efecto, toxicidad y estado ecotoxicológico nocivo. Los organismos más afectados por exposición de estos elutriados provenientes de tres zonas del río Ocoña son *D. magna*, *P. reticulata* y *L. minor*.

En líneas generales se resalta que a pesar de la presencia de elementos contaminantes en el elutriado de sedimentos de tres zonas del río Ocoña (arsénico y bario), que no sobrepasaron los umbrales de las directrices internacionales, sí generaron efectos en todos los bioindicadores evaluados, especialmente en *Daphnia magna*, organismo reconocido por su alta sensibilidad a los cambios ambientales y contaminantes; también se reporta que *D. magna* responde rápidamente a las variaciones en la calidad del agua, lo cual lo convierte en un organismo valioso para evaluar la salud ecológica a través de estudios toxicológicos (Ahmed, 2023). Por último, nuestros resultados apoyan lo reportado por Salesa (2021), quien menciona que este organismo desde hace décadas es un bioindicador de la contaminación por su alta sensibilidad a bajas concentraciones de numerosos compuestos contaminantes, entre otros motivos.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conclusiones

Los elutriados de sedimentos del río Ocoña presentaron concentraciones que no exceden los valores de la Línea Guía sobre la Calidad de Sedimentos para la Protección de Vida Acuática (ISQG) de Canadá tomada como referencia, pero destacamos al arsénico y bario como elementos con valores que pudieran ser los responsables de los efectos nocivos en los organismos de prueba.

Los elutriados obtenidos confirmaron que los sedimentos funcionan como sumideros y, al mismo tiempo, como fuentes potenciales de liberación de metales hacia la columna de agua, lo que incrementa la toxicidad y, en consecuencia, el riesgo ambiental y ecotoxicológico.

Lemna minor mostró reducciones significativas en número de frondas y biomasa, reflejando que los contaminantes de los elutriados afectan de forma negativa su crecimiento y desarrollo.

Daphnia magna fue el organismo más sensible a los elutriados, con los más altos porcentajes de mortalidad con respecto a los demás bioindicadores evaluados, lo que confirma su valor como organismo indicador temprano de toxicidad.

En *Poecilia reticulata*, aunque la mortalidad fue escasa, se observaron efectos subletales (reacción anormal e hiperventilación) provocados por los elutriados más concentrados; esto indica la presencia de un estrés fisiológico relevante.

El riesgo ambiental calculado evidencia toxicidad variada. Al considerar la supervivencia de los organismos, el sector de Secocha PE1

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

es el más impactado y posee una valoración de "altamente tóxico", principalmente para *Daphnia magna*.

Agradecimientos

Agradecemos a la escuela de Profesional de Ingeniería Pesquera de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por brindarnos las facilidades para hacer uso del Laboratorio de Acuicultura para realizar la experimentación de los bioensayos en sus instalaciones.

Financiamiento

La presente investigación fue financiada por el Fondo Concursable Proyectos de Tesis, convocatoria 2023-1 de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, en el marco del Contrato de Subvención N°PTTMD-40-2023-UNSA, correspondiente al esquema "Proyectos de Investigación Básica Aplicada".

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Declaración de uso de IA

En la presente investigación no se empleó IA.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Referencias

Ahmed, S. (2023). Applications of *Daphnia magna* in ecotoxicological studies: A review. *Journal of Advanced Research in Biology*, *6*(2), 16-35. https://www.researchgate.net/publication/376750470_Applications_of_Daphnia_magna_in_Ecotoxicological_Studies_A_Review

Alejos, R., Ynga, G., Gaspar, W., & Niño, A. (2021). Manual de desinfección y esterilización del material de laboratorio de alimento vivo: microalgas. *Informe-Instituto del mar del Perú*, *48*(1), 50-66. https://hdl.handle.net/20.500.12958/3530

ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2018). *Calidad del agua en el Perú: informe técnico anual*. Autoridad Nacional del Agua.

Arenazas-Rodriguez, A., Tejada-Meza, K., & Villalba-Condori, K. (2023). Evaluación ecotoxicológica de sedimentos en un tramo urbano y periurbano del río Chili en Arequipa (Perú), utilizando bioindicadores acuáticos. En: Smaniotto, C. *et al*. (eds.). *RUN ríos urbanos naturalizados, cultura & territorio* (No. 6, pp. 47-64). Edições Universitárias Lusófonas. https://doi.org/10.60543/ecati/9hzh-f430

Authman, M., Zaki, M., Khallaf, E., & Abbas, H. (2015). Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development*, *6*(4), 1-13. https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000328

Byeon, E., Kang, H., Yoon, C., & Lee, J. (2021). Toxicity mechanisms of arsenic compounds in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, *237*, 105901. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105901

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

CCME, Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). *Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables* (Guidelines). https://ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines

Ccanccapa-Cartagena, A., Chavez-Gonzales, F., Paredes, B., Vera, C., Gutierrez, G., Valencia, R., Paz, A., Zyaykina, N., Filley, T. & Jafvert, C. (2023). Seasonal differences in trace metal concentrations in the major rivers of the hyper-arid southwestern Andes basins of Peru. *Journal of Environmental Management*, *344*, 118493. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118493

Choque, Y., & Estremadoyro, M. (2024). *Contaminación ambiental por metales pesados en el río Piñog, Condesuyos-Arequipa, 2022* [Tesis de ingeniería, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Institucional de la Universidad Tecnológica del Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12867/8917

Cojocaru, P., Pastia, M. C., Biali, G., & Cojocaru, C. (2025). Heavy metal toxicity on *Daphnia magna*. *Environments*, *12*(3), 70. https://doi.org/10.3390/environments12030070

Czub, M., Nawała, J., Popiel, S., Brzeziński, T., Maszczyk, P., Sanderson, H., Maser, E., Gordon, D., Dziedzic, D., Dawidziuk, B., Pijanowska, J., Fabisiak, J., Szubska, M., Lang, T., Vanninen, P., Niemikoski, H., Missiaen, T., Lehtonen, K., Bełdowski, J., & Kotwicki, L. (2021). Acute aquatic toxicity of arsenic-based chemical warfare agents to *Daphnia magna*. *Aquatic Toxicology*, *230*, 105693. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105693

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Gaibor, J. L., Gaibor, M., & Pérez, B. (2024). Amenaza silenciosa: la presencia de metales pesados por fuentes antropogénicas y naturales. Implicaciones para la salud pública: una revisión narrativa. *Actas Médicas (Ecuador)*, *34*(1), 87-103. https://doi.org/10.61284/181

González-Martínez, F., Johnson-Restrepo, B., & Quiñones, L. A. (2024). Arsenic inorganic exposure, metabolism, genetic biomarkers and its impact on human health: A mini-review. *Toxicology Letters*, *398*, 105-117. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2024.06.008

Huaranga, F., Huaranga, F., Vela, O., & Vela, O. (2023). Determinación de la $CL_{50\text{-}96h}$ del hierro mediante pruebas toxicológicas sobre el "guppy" *Poecilia reticulata*. *Arnaldoa*, *30*(1), 35-50. https://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-32992023000100035

Iannacone, J., & Alvariño, L. (2007). Ecotoxicidad acuática de dos colorantes y de tres antiparasitarios de importancia en acuicultura en *Daphnia magna*. *Ecología Aplicada*, *6*(1-2). https://doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.346

Lee, M., Lee, J., An, Y., Park, C., Lee, S., Park, J, & Park, T. (2020). Development of water quality criteria for arsenic to protect aquatic life based on species sensitivity distribution. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 189*, 109933. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109933

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Loayza, J. (2025). *Contaminación de los efluentes líquidos de mina y su impacto en el sistema acuático superficial de la zona Otoca–Ayacucho, 2021* [Tesis de maestría, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. https://hdl.handle.net/20.500.13028/6209

Londoño-Franco, L., Londoño-Muñoz, P., & Muñoz-García, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *14*(2), 145-153. https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/489

Mamani, B., Biamont, I., & Calsin, B. (2021). Evaluación ecotoxicológica mediante bioensayo con *Daphnia pulex* en sedimentos del río Suches, Cojata Frontera Perú-Bolivia, 2019. *Fides et Ratio-Revista de Difusión Cultural y Científica de la Universidad La Salle en Bolivia, 22*(22), 191-215. http://www.scielo.org.bo/pdf/rfer/v22n22/v22n22_a11.pdf

Méniz-Oshiro, E., & Iannacone, J. (2023). Efectos ecotóxicos de metales pesados sobre *Daphnia magna* y *Paracheirodon innesi* en un río de la amazonía peruana. *Acta Biológica Colombiana*, *28*(3), 492-505. https://doi.org/10.15446/abc.v28n3.100746

Moreno-Aguirre, S., Vértiz-Osores, J., Paredes-Espinal, C., Meseth, E., Vílchez-Ochoa, G., Espino-Ciudad, J., & Flores-del-Pino, L. (2024). Ecological risk of metals in Andean water resources: A framework for early environmental assessment of mining projects in Peru. *Heliyon*, *10*(9), e30739. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30739

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. (2006). *Test No. 221: Lemna sp. growth inhibition test*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264016194-en

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. (2018). *Test No. 211: Daphnia magna reproduction test*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264070127-en

OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). *Test No. 203: Fish, acute toxicity test*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264069961-en

Oskarsson, A. (2015). Barium. In: Nordberg, G. F. *et al*. (eds.). *Handbook on the toxicology of metals* (Vol. 2, pp. 625-634). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59453-2.00029-9

Paccara, D. (2019). *Contaminación del agua por las actividades minero metalúrgicas* [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12565

Park, S. Y., Lee, J., Byeon, Y., & Khim, J. S. (2025). Systematic review of suspended sediment effects on aquatic organisms across taxa, developmental stages, and endpoints. *Marine Pollution Bulletin*, *221*, 118568. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118568

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Persoone, G., Marsalek, B., Blinova, I., Törökne, A., Zarina, D., Manusadzianas, L., Nalecz-Jawecki, G., Tofan, L., Stepanova, N., Tothova, L., & Kolar, B. (2003). A practical and user-friendly toxicity classification system with microbiotests for natural waters and wastewaters. *Environmental Toxicology*, *18*(6), 395-402. https://doi.org/10.1002/tox.10141

Roig, N., Sierra, J., Nadal, M., Moreno-Garrido, I., Nieto, E., Hampel, M., Perez, E., Schuhmacher, M., & Blasco, J. (2015). Assessment of sediment ecotoxicological status as a complementary tool for the evaluation of surface water quality. *Science of the Total Environment*, *503-504*, 269-278. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.125

Sackey, L. N., Kočí, V., & van Gestel, C. A. (2020). Ecotoxicological effects on *Lemna minor* and *Daphnia magna* of leachates from differently aged landfills of Ghana. *Science of the Total Environment*, *698*, 134295. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134295

Salesa, B. (2021). *Evaluación de los efectos producidos en Daphnia magna tras la exposición al fungicida procloraz y al insecticida piriproxifen* [Tesis doctoral, Universitat de València]. Repositori d'Objectes Digitals per a l'Ensenyament la Recerca i la Cultura (RODERIC). https://hdl.handle.net/10550/81152

Siqueira-Caixeta, E., Meza-Bravo, J., & Barbosa-Pereira, B. (2022). Ecotoxicological assessment of water and sediment river samples to evaluate the environmental risks of anthropogenic contamination. *Chemosphere*, *306*, 135595. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135595

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tejada-Meza, K., Arenazas-Rodríguez, A., Garcia-Chevesich, P. A., Flores-Farfan, C., Morales-Paredes, L., Romero-Mariscal, G., Ticona-Quea, J., Vanzin, G., Sharp, J. (2023). Acute ecotoxicity potential of untreated tannery wastewater release in Arequipa, Southern Peru. *Sustainability*, *15*(21), 15240. https://doi.org/10.3390/su152115240

Torres-Espirilla, A., & Paredes-de-Gómez, T. (2022). Distribution and assessment of the environmental risk of heavy metals in Aguada Blanca reservoir, Peru. *Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, *17*(4), e2838. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2838

USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2001). *Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: Technical manual* (EPA-823-B-01-002). https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/collectionmanual.pdf

Verbruggen, E. M. J., Smit, C. E., & van Vlaardingen, P. L. A. (2020). *Environmental quality standards for barium in surface water: Proposal for an update according to the methodology of the Water Framework Directive* (RIVM Report 2020-0024). National Institute for Public Health and the Environment (RIVM). http://hdl.handle.net/10029/623740

Wang, N.-X., Liu, Y.-Y., Wei, Z.-B., Yang, L.-Y., & Miao, A.-J. (2018). Waterborne and dietborne toxicity of inorganic arsenic to the freshwater zooplankton *Daphnia magna*. *Environmental Science & Technology*, *52*(15), 8912-8919. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02600

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Willems, D., Kumar, A., & Nugegoda, D. (2025). Chronic toxicity of dissolved barium and sodium chloride to the water flea *Ceriodaphnia dubia*: implications for unconventional gas flowback-produced waters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *44*(1), 169-183. https://doi.org/10.1093/etojnl/vgae019

Xue, Q., Ran, Y., Tan, Y., Peacock, C. L., & Du, H. (2019). Arsenite and arsenate binding to ferrihydrite organo-mineral coprecipitate: Implications for arsenic mobility and fate in natural environments. *Chemosphere*, *224*, 103-110. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.118

Yildiztugay, E., Ozfidan-Konakci, C., Arikan, B., Alp-Turgut, F. N., & Gulenturk, C. (2023). The regulatory effects of biochar on PSII photochemistry, antioxidant system and nitrogen assimilation in Lemna minor exposed to inorganic pollutants, arsenic and fluoride. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(5), 110713. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110713

Zaidi, S., Hayat, S., & Pichtel, J. (2024). Arsenic-induced plant stress: Mitigation strategies and omics approaches to alleviate toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, *213*, 108811. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108811

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)