

**Artículo original**

## **La contaminación por metales potencialmente tóxicos de sedimentos del río Coata, Puno, Perú**

[Pollution by potentially toxic metals of the sediments Coata River, Puno, Peru]

Dalmiro Cornejo-Olarte<sup>\*1</sup>, Wilson Sucari<sup>2</sup>, Germán Belizario-Quispe<sup>3</sup>, Katterine Cornejo-Puma<sup>4</sup>

1. Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica. Av. Floral, 1153, Puno, Puno, Perú. Correo electrónico: dcornejo@unap.edu.pe (D. Cornejo-Olarte \* Autor para correspondencia).
2. Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Facultad de Ciencias de la Educación. Av. Floral, 1153, Puno, Puno, Perú. Correo electrónico: wsucari@unap.edu.pe (W. Sucari).
3. Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Facultad de Ingeniería Agrícola. Av. Floral, 1153, Puno, Puno, Perú. Correo electrónico: gbelizario@unap.edu.pe (G. Belizario-Quispe).
4. Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas. Av. Floral, 1153, Puno, Puno, Perú. Correo electrónico: kcornejo.tryd.1@outlook.es (K. Cornejo-Puma).

---

### **Resumen**

La conservación de la calidad del agua dulce y su sedimento son importantes para uso doméstico, agropecuario, industrial y recreativo; por lo cual se evaluó la contaminación por metales tóxicos en sedimentos del río Coata hasta su desembocadura al Lago Titicaca (Perú), considerándose cinco puntos de muestreo durante dos épocas del año, utilizándose la técnica de muestreo simple y analizándose las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb). Para evaluar el grado de contaminación se comparó con los Estándares referenciales para sedimentos *TEL* (Threshold Effect Level) y *SESS* (Slightly Elevated Stream Sediments). Se reportan las concentraciones en sedimentos (mg/kg) para As (0,80 a 14,90), Cd (0,10 a 0,70) y Hg (0,004 a 0,30); las cuales superan los estándares de referencia *TEL* y *SESS*, y el Cr (4,10 a 28,41) supera el estándar de referencia *SESS*. El sedimento del río Coata transporta una carga de metales tóxicos, la carga de metales tóxicos en el sedimento del río Coata tiene un origen litogénico y antropogénico. Esta contaminación está particularmente relacionada con la descarga del río Torococha, que contribuye diariamente a la contaminación de estas aguas.

**Palabras clave:** Agua, Lago Titicaca, Metales pesados, Sedimentos, Toxicidad.

### **Abstract**

The conservation of freshwater quality and its sediment is important for domestic, agricultural, industrial, and recreational use. Therefore, the contamination by toxic metals in sediments of the Coata River was evaluated up to its mouth at Lake Titicaca (Peru). Five sampling points were considered during two seasons using simple sampling techniques, analyzing the concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), mercury (Hg), and Lead (Pb). To assess the level of contamination, it was compared with the Threshold Effect Level (TEL) and Slightly Elevated Stream Sediments (SESS) reference standards. Concentrations in sediments (mg/kg) for As (0,80 to 14,90), Cd (0,10 to 0,70), and Hg (0,004 to 0,30) were reported, which exceed the TEL and SESS reference standards. Additionally, Cr (4,10 to 28,41) exceeds the SESS reference standard. The sediment in the Coata River carries a load of toxic metals. This contamination in the sediment has a lithogenic and anthropogenic origin and is particularly associated with the discharge from the Torococha River, which daily contributes to the pollution of these waters.

**Keywords:** Heavy metals, Sediments, Titicaca Lake, Toxicity, Water.

**Recibido:** 22 de febrero del 2022.

**Aceptado para publicación:** 13 de diciembre del 2023.

## INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio: suficiente, inocuo y accesible (WHO, 2017). Su disponibilidad es paulatinamente menor debido a su contaminación por diversos compuestos orgánicos e inorgánicos, esto lleva a un desequilibrio ambiental, económico y social (Esponda, 2001). Existen dos criterios fundamentales para identificar sustancias químicas (metales tóxicos) específicas de interés para la salud pública (Thompson *et al.*, 2007): 1) alta probabilidad de exposición al consumir el agua potable y, 2) peligro significativo para la salud. Se considera que el agua está contaminada, cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, deteriorando su calidad y aumentando su costo de tratamiento, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas (ANA, 2016; Tundisi *et al.*, 2014; Tundisi y Tundisi, 2010). Los metales pesados pueden clasificarse en dos grupos; elementos como: cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe) y otros (bioelementos secundarios), y metales que no tienen un rol biológico conocido: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb); pero sí una clara toxicidad, que derivan de la actividad minera e industrial, cuyos efectos toxicológicos constituyen un serio riesgo para la salud humana y la ecología (Gonzalez *et al.*, 2002; Flores *et al.*, 2018).

Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y, en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Rodríguez y Durán, 2006; UNESCO, 2017). También hay que considerar la erosión litogénica (Chen, 2017) y las actividades minero-metalúrgicas (Espinoza, 2017) que aportan grandes cantidades de metales y metaloides a los ríos y forman

sedimentos superficiales en el lecho de los ríos (Espinar, 2017; López, 1981).

Los sedimentos se van formando por acumulación de materiales de origen detrítico, químico u orgánico, resultantes de la erosión de rocas, precipitación de elementos disueltos en el agua (formación de sales: sulfatos, carbonatos y sílice) (Håkanson y Jansson, 1983), acumulación de materia orgánica; depositándose al disminuir la energía del fluido que los transporta (agua o viento). Los sedimentos pueden actuar como portadores y posibles fuentes de contaminación en razón de que los metales son movilizados y liberados a la columna del agua, por cambios en las condiciones ambientales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos (Förstner, 1993). En general, la composición química de un sedimento resulta de un componente orgánico (microorganismos, residuos, detritus) e inorgánicos. La naturaleza química primaria de un sedimento está determinada por los procesos de meteorización que lo han originado y de fraccionamiento mecánico (lavado), por efecto del transporte y la deposición (Ramírez, 1987; Valdés y Sifeddine, 2009). La composición original puede cambiar después de la deposición por procesos de diagénesis, litificación y metamorfismo (Huerta-Diaz *et al.*, 2014). Estos sedimentos son la fuente principal de contaminación de aguas por metales pesados (Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, Hg y otros) y metaloides (As y Sb) (Chen *et al.*, 2016; Dhanakumar *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2017; Sindern *et al.*, 2016; Varol, 2011; Zhang *et al.*, 2016).

Los metales tóxicos como el arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb), son elementos potencialmente tóxicos para el ser humano, que podrían causar daños severos en la vida humana, cuyos efectos pueden ser: erupciones cutáneas, ulceras y malestar de estómago, problemas respiratorios, cáncer de pulmón, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, afecciones cardíacas, óseas,

testiculares y del sistema nervioso central y periférico o la muerte (Suthersan, 2007; Nava-Ruiz, 2011).

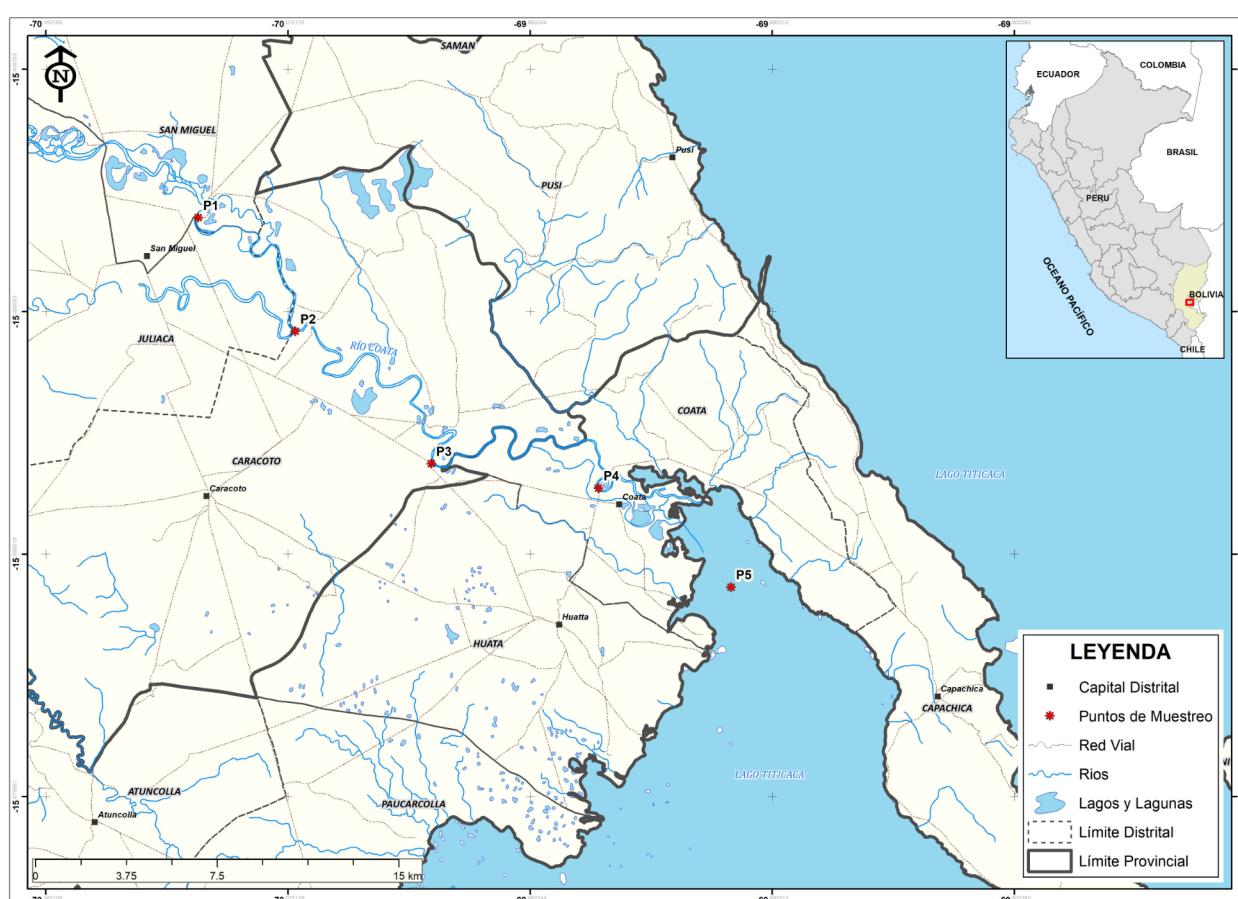
En el departamento de Puno el vertimiento incontrolado y sin tratamiento de las aguas servidas de la ciudad de Juliaca al río Torococha, siendo este el principal afluente del río Coata, es posiblemente que sea la causa de su contaminación por metales tóxicos (Belizario *et al.*, 2019; Inquilla, 2020), así como por agentes patógenos (Menendez, 2018). Actualmente alrededor de 40 m<sup>3</sup>/s de agua residual sin tratamiento, es entregado a fuentes superficiales y cerca de 4000 hectáreas de tierras agrícolas son regadas con dichas aguas. (ANA, 2009). Como es el caso del río Coata que viene degradando de manera alarmante la vida acuática, en su recorrido hasta la desembocadura en el lago Titicaca (Pari-Huaquisto *et al.*, 2020). Por lo cual el objetivo fue evaluar la contaminación de río Coata por presencia de metales tóxicos en aguas y

sedimentos hasta la desembocadura al Lago Titicaca, Puno, Perú.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Área de estudio

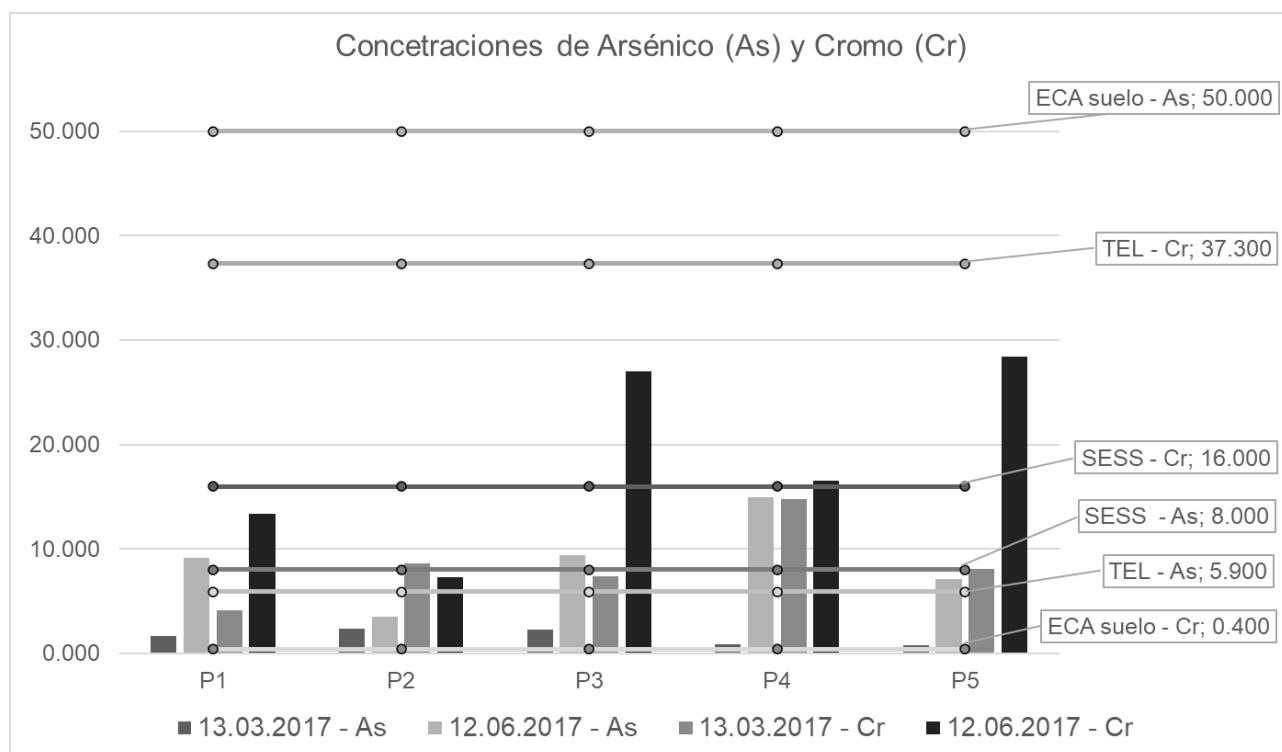
La cuenca del río Coata, se encuentra ubicada entre las coordenadas UTM WGS84 Norte 8328509 a 8239696 y Este 282907 a 401525. Ubicada en el departamento de Puno (provincias de San Román y Puno). La cuenca posee una superficie total de 4908,44 km<sup>2</sup>, a la que le corresponde una superficie de 1559,87 km<sup>2</sup> (31,78 %) a la cuenca del río Lampa y una superficie de 2888,61 km<sup>2</sup> (58,85 %) a la cuenca del río Cabanillas y la superficie restante de 459,96 km<sup>2</sup> (9,37 %) a la subcuenca del bajo Coata, cuyas aguas desembocan al lago Titicaca (ATDR, 2007). La investigación se realizó de marzo a junio del 2017 (época de lluvia y estiaje), seleccionándose 5 puntos de muestreo (Figura 1 y Tabla 1).



**Figura 1.** Puntos de muestreo de sedimentos del río Coata, Puno, Perú.

**Tabla 1.** Coordenadas de los puntos de muestreo en el río Coata, Puno, Perú.

Nombre de la muestra	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
P1	15° 27' 51,25" S	70° 06' 19,73" O
P2	15° 30' 23,03" S	70° 04' 09,90" O
P3	15° 33' 19,92" S	70° 01' 08,06" O
P4	15° 33' 52,68" S	69° 57' 24,41" O
P5	15° 36' 04,88" S	69° 54' 27,11" O

**Figura 2.** Concentraciones de As y Cr (mg/kg) en sedimentos del río Coata, Puno, Perú.

### Toma de muestras de sedimentos

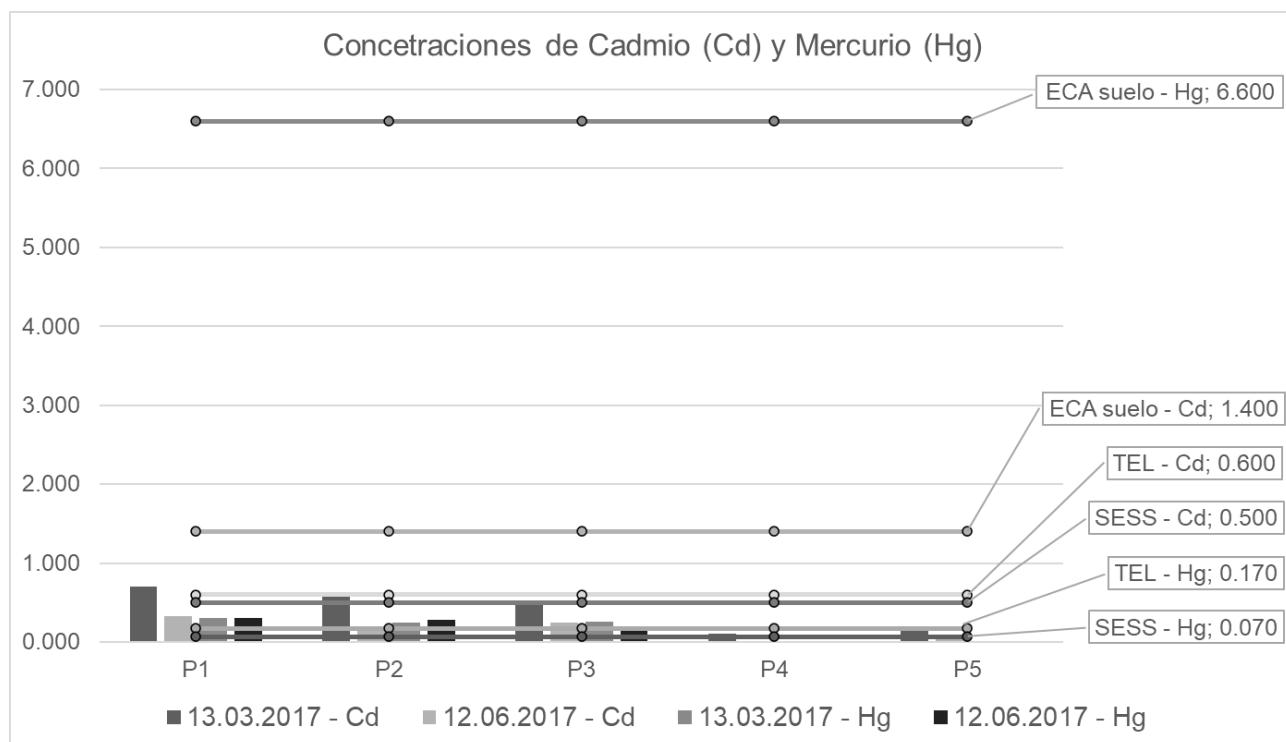
Se colectó simultáneamente de varias partes del punto de referencia, se mezcló en un recipiente de polietileno de 20 L, se cuartearon y guardaron 500 g aproximadamente, en un recipiente de 500 mL de polietileno para ser transportados al laboratorio para su análisis respectivo, cumpliendo protocolos de muestreo (CENMA, 2012; MINAM, 2014).

### Determinación de los parámetros químicos

En las muestras colectadas de sedimentos se analizaron: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb) por el Método Analítico ICP-AES - EPA 200.7. Revisión 4.4 (USEPA, 1994).

### Análisis de los datos

Se comparó los resultados de las concentraciones analizadas en sedimentos de los metales y metaloide, utilizándose



**Figura 3.** Concentraciones de Cd y Hg (mg/kg) en sedimentos del río Coata, Puno, Perú.

estándares referenciales de calidad de sedimentos internacionales (*TEL* y *SESS*, Tabla 2), también se aplicó un análisis de estadística descriptiva.

## RESULTADOS

### Análisis químico de sedimentos

Se obtuvo los siguientes resultados: arsénico (0,80 a 14,92), cadmio (0,1 a 0,7), cromo (4,10 a 28,42), mercurio (0,004 a 0,30) y plomo (3,75 a 16,50) en mg/kg (ver tabla 3).

## DISCUSIÓN

### Metales tóxicos en Sedimentos

El contenido de metales trazas esenciales y potencialmente tóxicos presentes en los sedimentos superficiales en el río Coata tienen origen litogénico y antropogénicas especialmente relacionada a la descarga del río Torococha (principal cuerpo receptor de aguas residuales de la ciudad de Juliaca), quienes se van depositando a partir de sólidos en suspensión transportados por el río y

permitiendo que se acumulen en la materia orgánica del sedimento (Martinez, 1988), en su recorrido hasta su desembocadura en el lago Titicaca perturbando su ecosistema. Los resultados obtenidos en los sedimentos indican que los metales As, Cd, Cr y Hg superan los estándares de referencia internacionales (Tabla 2), estos resultados son similares a los obtenidos por otros estudios: 150 de As, 0,15 de Hg, 55 de Pb (mg/kg) en el río Ramis otro afluente del lago Titicaca (Cornejo et al., 2009); en Loreto, Perú, se obtuvo medidas de 1,636 en creciente a 3,03 ppm en vacante de Hg en el río Nanay (Sotelo et al., 2013); entre 0,19 y 1,19 mg/kg, en la región de La Mojana norte de Colombia (Pinedo et al., 2015); 0,12 a 3,6 de Cd, 22,4 a 172,2 de Cr, 5,6 a 326,2 de Pb, en mg/kg (Maanan et al., 2015); 20,79 de As, 0,80 de Cd, 70,10 de Cr, 0,14 de Hg, 25,85 de Pb, (medias en mg/kg) en la cuenca del río Huaihe (China) (Fu et al., 2014); 16,79 y 23,81 de As, 70,06 y 92,11 de Cr, 1,51 y 2,50 de Cd, 38,33 y 49,04 de Pb (promedios en mg/kg) en verano e invierno respectivamente en el río Karnaphuli-Bangladesh (Ali et al., 2016).

**Tabla 2.** Estándares referenciales internacionales de calidad de sedimentos (*TEL*: Threshold Effect Level; y *SESS*: Slightly Elevated Stream Sediments (MacDonald *et al.* 2000; Burton G. 2002).

Elemento	As	Cd	Cr	Hg	Pb
<i>TEL</i> (mg/kg)	5,90	0,60	37,3	0,17	35,0
<i>SESS</i> (mg/kg)	8,00	0,50	16,0	0,07	28,0

**Tabla 3.** Resultado del análisis químico de sedimentos en mg/kg del río Coata, Puno, Perú.

Elemento	Época	P1	P2	P3	P4	P5	Mín	Max
Arsénico (As)	Lluvia	1,700	2,400	2,300	0,900	0,800	0,800	<b>2,400</b>
	Estiaje	9,167	3,500	9,417	14,917	7,083	3,500	<b>14,917</b>
Cadmio (Cd)	Lluvia	0,700	0,600	0,500	0,100	0,200	<b>0,100</b>	0,700
	Estiaje	0,333	0,167	0,250	0,000	0,083	0,000	<b>0,333</b>
Cromo (Cr)	Lluvia	4,100	8,600	7,400	14,800	8,100	<b>4,100</b>	14,800
	Estiaje	13,333	7,250	27,000	16,500	28,417	7,250	<b>28,417</b>
Mercurio (Hg)	Lluvia	0,300	0,250	0,261	0,004	0,011	<b>0,004</b>	0,300
	Estiaje	0,300	0,280	0,200	0,007	0,011	0,007	<b>0,300</b>
Plomo (Pb)	Lluvia	16,500	16,000	14,200	5,700	8,300	5,700	<b>16,500</b>
	Estiaje	7,500	3,750	5,500	10,833	4,583	<b>3,750</b>	10,833

A futuro es importante continuar con el estudio y monitoreo de los elementos potencialmente contaminantes como: cromo, cadmio, mercurio, plomo y arsénico en la cuenca del río Coata para así tener evidencia de la contaminación en el tiempo.

#### Metales tóxicos en Aguas

De acuerdo a los análisis del agua del río Coata llevadas a cabo por Belisario *et al.* (2019), para el metaloide arsénico (As), concentraciones de 0,0001 a 0,029 mg/L que supera los estándares de calidad de agua en concordancia con la legislación nacional e internacional, esto se debe al origen litogénico y antropogénico como lo demuestran estudios similares en la región: 0,012 a 0,059 mg/L en el río Coata (Inquilla, 2020); 0,042 a 0,103 mg/L en el río Coata

(Callasaca, 2019); en la cuenca del río Ramis en Puno (Perú) se obtuvo un máximo de 0,08 mg/L (Cornejo *et al.*, 2009), superando los límites permisibles para Perú. En estudios similares llevados a cabo en North Carolina (Estados Unidos) se obtuvo resultados de 20,0 a 40,0 µg/L de As en descargas de aguas residuales de la Power and Light Company's Roxboro Station, que fueron removidas por coprecipitación de hierro, utilizándose un sistema de coagulación química (Merrill *et al.*, 1987). De 3,0 a 50,0 µg/L en aguas superficiales de la ciudad de Jamshoro, en Pakistán (Baig *et al.*, 2009); de 1,2 a 206,0 µg/L en un acuífero de Punjab, Pakistán (Shakoor *et al.*, 2018). Así mismo se reportó para Fe de 0,09 a 4,28 mg/L en aguas subterráneas y 0,02 a 0,38 mg/L en agua superficial (Baig *et al.*,

2009); 0,09 a 1,93 mg/L en un acuífero de Punjab - Pakistán (Shakoor et al., 2018); Hg de 0,0039 a 0,0203 mg/L y Pb de 0,0007 a 0,0086 mg/L (Macilla, 2017); 0,0025 de Cd, 0,5 de Cu y 0,15 de Ni (mg/L) en lodos de aguas residuales en una planta de Thessaloniki, Grecia (Pontoni, 2016); y 11,78 de Fe, 1,17 de Pb, 0,48 de Cd, 5,4 de Cu y 1,74 de Ni (mg/L) en lodos de la planta de tratamiento El-Ahlia en Egipto (Hegazi, 2013).

## CONCLUSIONES

Los resultados en sedimentos muestran altas concentraciones (en mg/kg) de: As (0,80 a 14,92), Cd (0,10 a 0,70) y Hg (0,004 a 0,30), que superan los estándares de referencia TEL y SESS; y Cr (4,10 a 28,41) que supera el estándar de referencia SESS. Estos resultados demuestran que el sedimento del río Coata transporta una carga de metales potencialmente tóxicos de origen litogénico y antropogénico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, M., Ali, M., Islam, M., Rahman, M. (2016) Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 5, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.002>.
- ANA. (2009) Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos del Perú. Comisión Técnica Multisectorial conformada por R.M. N° 051-2007-PCM Calle Diecisiete N° 355 Urbanización El Palomar – San Isidro Lima 27 – Perú
- ANA. (2016) *Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos Superficiales*. Lima Perú: Autoridad Nacional del Agua; Biblioteca Nacional del Perú, Grafica Industrial Alarcon SRL; Lima Perú.
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña, C. y Cedenilla, O. (2003) Contaminación por cromo en el agua intersticial, En El agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama. *Limnetica*, 22(4), 87–100.
- ATDR. (2007) *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa*. Juliaca – Perú: Ministerio de Agricultura, Juliaca Perú.
- ATSDR. (2002) *Toxicological Profile for Mercury*. in ATSDR's Toxicological Profiles. Atlanta, Georgia 30333: CRC Press. Atlanta, Georgia 30333.
- ATSDR. (2002) *Toxicological Profile for Lead*. In ATSDRs Toxicological Profiles. Taylor & Francis Group. [https://doi.org/10.1201/9781420061888\\_ch106](https://doi.org/10.1201/9781420061888_ch106)
- Baig, J. A., Kazi, T. G., Arain, M. B., Afridi, H. I., Kandhro, G. A., Sarfraz, R. A., Jamal, M. K., & Shah, A. Q. (2009) Evaluation of arsenic and other physico-chemical parameters of surface and ground water of Jamshoro, Pakistan. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 662–669. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.069>
- Baldwin, Dianne R., William J. M. (1999) Heavy Metal Poisoning and Its Laboratory Investigation. *Annals of Clinical Biochemistry*, 36(3), 267–300.
- Belizario, G., Capacoila, J., Huaquisto, E., Cornejo, D. A. y Chui, H. N. (2019) Determinación del contenido de fosforo y arsenico, y de otros metales contaminantes de las aguas superficiales del río Coata, afluentes del Lago Titicaca, Perú. *Rev. Boliv. Quim.* 36(5): 223-228.
- Bernhoft, R. A. (2012) Mercury Toxicity and Treatment: A Review of the Literature. *Journal of Environmental and Public Health*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2012/460508>
- Björkman, L., Lundekvam, B. F., Lægreid, T., Bertelsen, B. I., Morild, I., Lilleng, P., Lind, B., Palm, B., Vahter, M. (2007) Mercury in human brain, blood, muscle and toenails in relation to exposure: an autopsy study. *Environmental Health*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/1476-069x-6-30>
- Burton G. Allen, Jr. (2002) REVIEW ARTICLE *Sediment quality criteria in use around the world*. The Japanese Society of Limnology, 3:65–75

- Campbell, P. G. C. (2006) Cadmium—A Priority Pollutant. *Environmental Chemistry*, 3(6): 387. <https://doi.org/10.1071/en06075>.
- Callasaca Pacheco Rosa (2019) Tesis: Influencia de fuentes puntuales de contaminación en la calidad de agua del río Coata, en el tramo puente Maravillas y puente Coata, Puno 2018. Optar Titulo de Ingeniero Sanitario y Ambiental. Universidad Andina Nestor Cáceres Velásquez. Juliaca. Perú.
- CENMA-MMA. (2012) *Programa de Monitoreo y Control para la elaboración y revisión de Normas de Emisión*. Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA), para el Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente. Santiago de Chile Diciembre
- Cano, S. E. (2012) Contaminación con Mercurio por la actividad minera. *Biomedica*, 32(3).
- Carlotto, V. (2014) *El arsénico y el mercurio en aguas y suelos de las zonas mineralizadas: El Caso de Espinar (Cusco). Aguas y arsénico natural en Perú. Jornada de la Academia Nacional de Ciencias. Sociedad Geográfica de Lima*. 36–51.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz-Martínez\*, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., y Cueva, E. (2009) "Dominios Geotectónicos y Metalogenesis del Perú." *Bol. Soc. Geol. Perú*, 103, 1–89.
- Chapman, D. V. (1992) *Water Quality Assessments*. Vol. 2. edited by Deborah Chapman. Abingdon, UK: Taylor y Francis.
- Chen, H., Wang, J., Chen, J., Lin, H., Lin, C. (2016) Assessment of heavy metal contamination in the surface sediments: A reexamination into the offshore environment in China. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1-2): 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.079>
- Chen, W. Y. (2017) Environmental externalities of urban river pollution and restoration: A hedonic analysis in Guangzhou (China). *Landscape and Urban Planning*, 157, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.010>
- Cornejo, D. A., y Pacheco, M. E. (2009) Contaminación de aguas y sedimentos por As, Pb y Hg de la cuenca del río Ramis, Puno-Perú. *Revista Investig.* (Esc. Posgrado), 5(4): 33–46.
- Counter, S., Buchanan, L. H. (2004) Mercury exposure in children: a review. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 198(2): 209–230. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2003.11.032>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010) *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba - Bolivia: Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba - Bolivia.
- Dhanakumar, S., Solaraj, G., Mohanraj, R. (2015) Heavy metal partitioning in sediments and bioaccumulation in commercial fish species of three major reservoirs of river Cauvery delta region, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.032>
- Doadrio, A. L. (2004) *Revisión Ecotoxicología y Acción Toxicológica del Mercurio*. Vol. 70.
- EPA. (2008) *Lead and Copper Rule: A Quick Reference Guide Public Health Benefits*. United States Environmental Protection Agency
- Espinar, A. (2017) *Políticas de gestión del agua en las operaciones de Buenaventura*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Espinoza, A. (2017) *Calidad del agua en el Perú. Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales*. Lima: Primera ed.
- Esponda, A. (2001) *Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales*. Facultad de Química. Universidad Autónoma de México.
- Evanko, C. R., Dzombak, D. A. (1997) *Technology GWRTAC Evaluation Report [I] Remediation Of Metals-Contaminated Soils and Groundwater Ground-Water Remediation*. Pp. 373–1973 in *Ground-*

- Water Remediation Technologies Analysis Center. Pittsburgh, Pa, USA.
- Flores Carmen M., Del-Angel Ebelia, Frías Dora M. y Gómez Ana L. (2018) Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnol. cienc. agua* vol.9 no.2 Jiutepec mar./abr. 2018 Epub 24-Nov, <https://doi.org/10.24850/jtyca-2018-02-02>
- Förstner, U. (1993) Metal Speciation - General Concepts and Applications. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 51(1-4), 5-23. <https://doi.org/10.1080/03067319308027608>
- Fu, J., Zhao, C., Luo, Y., Liu, C., Kyzas, G. Z., Luo, Y., Zhao, D., An, S., Zhu, H. (2014) Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors. *Journal of Hazardous Materials*, 270, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.044>
- Futsaeter, G., Wilson, S. (2013) *The UNEP Global Mercury Assessment: Sources, Emissions and Transport*. P. 36001 in *E3S Web of Conferences*. Vol. 1. EDP Sciences.
- González, M. N., Orozco, C., Pérez, A., Alfayate, J., y Rodríguez, F. (2002) *Contaminación Ambiental. Una visión desde la química*. Editorial Paraninfo. Madrid.
- González, V., y Alvarado, A. (2002) Flora cutánea como protección y barrera de la piel normal. *Rev Cent Dermatol Pascua*, 11(1): 18-21
- Guzzi, G., Grandi, M., Cattaneo, C., Calza, S., Minoia, C., Ronchi, A., Severi, G. (2006) Dental amalgam and mercury levels in autopsy tissues: food for thought. *The American journal of forensic medicine and pathology*, 27(1): 42-45. <https://doi.org/10.1097/01.paf.0000201177.62921.c8>
- Håkanson, L., Jansson, M. (1983) *Principles of Lake Sedimentology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
- Deming, H., Cheng, J., Xianfeng, H., Jiang, J., Lei, M., Xu, H., Ma, Y., Chen, X., Wang, H. (2017) Spatial Distribution, Risk Assessment and Source Identification of Heavy Metals in Sediments of the Yangtze River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1–2): 141–48. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.062>
- Hegazi, H. A. (2013) Removal of Heavy Metals from Wastewater Using Agricultural and Industrial Wastes as Adsorbents. *HBRC Journal*, 9(3): 276-82. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.004>
- Hernández, R., Ortega, M., Sánchez, J., Alvarado, R. y Aguilera, M. (2009) Ocurrencia nictémera del fitoplancton en la época de lluvias en el lago tropical profundo de Tacámbaro, Michoacán, México. *Revista de la DES*, 55(11): 48-55.
- Huerta-Díaz, M. A., Muñoz-Barbosa, A., Xose, L. O., Valdivieso-Ojeda, J., Amaro-Franco, E. (2014) High Variability in Geochemical Partitioning of Iron, Manganese and Harmful Trace Metals in Sediments of the Mining Port of Santa Rosalia, Baja California Sur, Mexico, *Journal of Geochemical Exploration*, (145): 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.05.014>
- Inquilla Ccalla Claudia (2020) Calidad microbiana y físico-química de las aguas del río Coata, Puno–2018. (Tesis de Pre grado). Universidad Nacional del Altiplano. Repositorio Institucional. Puno. Perú
- Kabata-Pendias, A. (2004) Soil–Plant Transfer of Trace Elements—an Environmental Issue *Geoderma*, 122(2–4): 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.004>
- López, M. V. (1981) Tratamiento biológico de aguas residuales en perspectiva de la biotecnología en México. Editorial CONACYT, México
- Maanan, M., Saddik, M., Maanan, M., Chaibi, M., Assobhei, O., Zourarah, B., (2015) Environmental and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Nador Lagoon, Morocco. *Ecological*

- Indicators*, (48): 616-626. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.034>
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., Berger, T. A. (2000) Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1): 20-31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>.
- Mancilla-Villa Oscar, Fregoso-Zamorano Blanca, Hueso-Guerrero Eva, Guevara-Gutiérrez Ruben, Palomera-García Carlos; Olguín-López Jose; Ortega-Escobar Hector, Medina Valdovinos Karen y Flores-Magdaleno Hector (2017) Concentración iónica y metales pesados en el agua de riego de la cuenca del río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería. IDESIA (Chile) Septiembre, Volumen 35, Nº 3. Páginas 115-123
- Marín, A., González, V. H., Lapo, B., Molina, E., Lemus, M. (2016) Niveles de mercurio en sedimentos de la zona costera de El Oro, Ecuador mercury in sediments at El Oro Province, Ecuador. *Gayana*, 80(2): 147-153.
- Martínez M. (1988) *Influencia del agua de mar sobre los fenómenos de acumulación y remoción de las especies químicas: Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Co, Cl, y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en sedimentos secos de la cuenca del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. 116 pp.
- Maya, P., y Hansen, A. (1995) *Competencia de iones mayores en la migración química de cadmio y plomo en sedimentos del lago de Chapala*, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Menendez Coaquira Wilfredo (2018) Tesis: Evaluación de parámetros físico-químicos y calidad bacteriológica del río Coata - Región Puno 2015. Grado de Maestro en Ciencias. Mención en Ingeniería Ambiental- Moquegua. Perú.
- Merrill, D. T., Manzione, M., Parker, D., Petersen, J., Chow, W., Hobbs, A. (1987) Field Evaluation of Arsenic and Selenium Removal by Iron Coprecipitation. *Environmental Progress*, 6(2): 82-90. <https://doi.org/10.1002/ep.670060209>
- MINAM. (2014) Guía para Muestreo de Suelos. Ministerio del Ambiente (Perú)
- MINAM1. (2017) Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. Ministerio del Ambiente (Perú)
- MINAM2. (2017) Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Ministerio del Ambiente (Perú)
- National Research Council. (1999) *Arsenic in Drinking Water*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/6444>.
- Ontiveros-Capurata, R., Diakite-Diakite, M., Álvarez-Sánchez, E., Coras-Merino, P. (2013) Evaluación de aguas residuales de la ciudad de México utilizadas para riego. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(4): 127-40.
- Ospina, O., García, G., Gordillo, J., y Tovar, K. (2016) Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el Río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria*, 12(19): 19-36. <https://doi.org/10.16925/in.v12i19.1191>.
- Pinedo-Hernández J., Marrugo-Negrete J. y Díez S. (2015) Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere* 119, 1289-1295. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2014.09.044](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.044)
- Pontoni, L. (2016) Accumulation and Colloidal Mobilization of Trace Heavy Metals in Soil Irrigated with Treated Wastewater. l'Université Paris-Est.
- Ramírez, G. (1987) Características hidroquímicas y composición química de los sedimentos de la bahía de Nenguange, Caribe Colombiano. *Invemar. Org.Co*, (17): 15-26.
- Ribeiro, V., Grandizoli T., Gaspar R., Fonseca, C. (2015) Physical-Chemical Effects of Irrigation with Treated Wastewater on Dusky Red Latosol Soil. *An Interdisciplinary Journal of Applied Science Rev. Ambient. Água*, 10. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

- Rodríguez-Momroy, J., y Durán-de-Bazúa, C. (2006) Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 21(1): 25-33. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48221104>
- Salomons, W., & Förstner, U. (1984) *Sediments and the Transport of Metals*. pp. 63–98 in *Metals in the Hydrocycle*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Shakoor, M. B., Bibi, I., Niazi, N. K., Shahid, M., Nawaz, M. F., Farooqi, A., Naidu, R., Rahman, M. M., Murtaza, G., Lüttge, A. (2018) The evaluation of arsenic contamination potential, speciation and hydrogeochemical behaviour in aquifers of Punjab, Pakistan. *Chemosphere*, 199, 737-746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.002>
- Sindern, S., Tremöhlen, M., Dsikowitzky, L., Gronen, L., Schwarzbauer, J., Siregar, T. H., Ariyani, F., & Irianto, H. E. (2016) Heavy metals in river and coast sediments of the Jakarta Bay region (Indonesia) — Geogenic versus anthropogenic sources. *Marine Pollution Bulletin*, 110(2): 624-633. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.003>
- Sotelo-Solis Victor, Alva-Astudillo Mario (2013) Contenido de metales pesados en agua y sedimento en el bajo Nanay. *Ciencia amazónica*, 3(1): 24-32.
- Sun, Y., Zhuang, G., Zhang, W., Wang, Y., & Zhuang, Y. (2006) Characteristics and sources of lead pollution after phasing out leaded gasoline in Beijing. *Atmospheric Environment*, 40(16):2973-2985. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.032>
- Tee, P.-F., Abdullah, M. O., Tan, I. A. W., Amin, M. A. M., Nolasco-Hipolito, C., Bujang, K. (2017) Effects of temperature on wastewater treatment in an affordable microbial fuel cell-adsorption hybrid system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1): 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.040>
- Thompson, T., Fawell, J., Kunikane, S. y Jackson, D. (2007) *Chemical Safety of Drinking-Water: Assessing Priorities for Risk Management*. 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland.
- Ticona Carrizales Lucio, Ferro-Gonzales Polan Franbalt, Apaza-Panca Cynthia Milagros, Parillo Sosa Enrique Gualberto, Yapuchura Saico Cristobal Rufino, Rodríguez Chokewanca Ingrid Rossana (2021) Evaluation of environmental parameters in the Espinar Puno stabilization lagoon. *Heliyon* 7.e06959 journal homepage: [www.cell.com/heliyon](http://www.cell.com/heliyon)
- Tundisi, J., Tundisi, T. (2010) Impactos potenciais das alterações do código florestal nos recursos hídricos. *Biota Neotrop*, 10(4): 67-76.
- Tundisi, J., Matsumura-Tundisi, T., Virginia, C., & Barbosa, F. (2014) *Water Availability, Water Quality Water Governance: The Future Ahead*, 366. IAHS Publ.
- UNESCO. (2017) *Aguas Residuales el recurso desaprovechado*. París 07 SP, Francia.
- USEPA. (1994) *Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*, Revision 4.4. Cincinnati, OH.
- USEPA. (2001) *Update of Ambient Water Quality Criteria for Cadmium*. United States Environmental Protection Agency
- Valdés, J., y Sifeddine A. (2009) Composición elemental y contenido de metales en sedimentos marinos de la bahía Mejillones del Sur, Chile: Evaluación ambiental de la zona costera. *Scielo. Conicyt.Cl Latin American Journal of Aquatic Research*, 37(2): 131-41. <https://doi.org/10.3856/vol37-issue2-fülltext-2>
- Varol, M. (2011) Assessment of Heavy Metal Contamination in Sediments of the Tigris River (Turkey) Using Pollution Indices and Multivariate Statistical Techniques. *Hazardous Materials*, 195(15): 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.hazmat.2011.08.051>
- Warren, L. (1981) Contamination of Sediments by Lead, Zinc and Cadmium: A Review.

- Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 2(6): 401-36. [https://doi.org/10.1016/0143-148X\(81\)90037-9](https://doi.org/10.1016/0143-148X(81)90037-9)
- Weggler, K., Michael J., Graham, R. (2004) Effect of Chloride in Soil Solution on the Plant Availability of Biosolid-Borne Cadmium. *Journal of Environmental Quality*, 33(2): 496-504. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.4960>
- WHO. (2002) *Evaluation of the H2S Method for Detection of Fecal Contamination of Drinking Water*. First adde. Switzerland.
- WHO. (2017) *Guidelines for Drinking-Water Quality*. First adde. Switzerland: Cover design by WHO Graphics. First adde. Switzerland.
- WHO As. (2011) *Arsenic in Drinking-Water*. World Health Organization
- WHO Cd. (2011) *Cadmium in Drinking-Water*. World Health Organization
- WHO Cr. (2003) *Chromium in Drinking-Water*. World Health Organization
- Zhang, Z., Li J., Zulpiya M., Ye, Q. (2016) Sources Identification and Pollution Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bortala River, Northwest China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, (126): 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.025>.

### **Conflictode interés**

Los autores manifestamos no tener conflicto de intereses y estamos de acuerdo con el contenido desarrollado en el presente artículo científico. De igual manera, ponemos en conocimiento que el autor para correspondencia fue elegido de manera unánime en función a su mayor aporte en la investigación.