

Evaluación de la presencia y concentración de metales pesados en las aguas del Lago de Ilopango, El Salvador

Assessment of the presence and concentration of heavy metals in the waters of Lake Ilopango, El Salvador

Marcos T. Orellana

0009-0008-2012-5376

Universidad de El Salvador, El Salvador

O13001@ues.edu.sv

Rafael Gómez-Escoto

0000-0002-8367-1349

Universidad de El Salvador, El Salvador

gomez.escoto@ues.edu.sv

Recibido: 30/11/2023

Aceptado: 10/12/2023

Publicado: 30/12/2025

Citación/como citar este artículo: Orellana, M. T., & Gómez-Escoto, R. (2025). Evaluación de la presencia y concentración de metales pesados en las aguas del Lago de Ilopango, El Salvador. *Ásstery Journal*, 1(1), 7-16.

Resumen

Este artículo evalúa las concentraciones de metales pesados (Pb, As y Cr) en el Lago de Ilopango mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF), analizando muestras superficiales y a 20 metros de profundidad. El objetivo es determinar el nivel de contaminación y la viabilidad de potabilización del recurso hídrico a través de un monitoreo de seguimiento de las campañas 1 y 2. Los análisis, procesados espacialmente mediante QGIS y el método de vecinos más cercanos, revelan una contaminación severa: los niveles de Arsénico y Plomo superan hasta 27 y 38 veces los límites normativos, respectivamente. Dada la magnitud de estos excedentes, se concluye que los métodos de potabilización convencionales son insuficientes.

Palabras claves: metales pesados; contaminantes; Lago de Ilopango; muestras de agua; fluorescencia de rayos X.

Abstract

This article evaluates the concentrations of heavy metals (Pb, As, and Cr) in Lake Ilopango using Total Reflection X-ray Fluorescence (TXRF), analyzing surface samples and samples taken at a depth of 20 meters. The objective is to determine the level of contamination and the feasibility of making the water potable through follow-up monitoring during campaigns 1 and 2. The analyses, spatially processed using QGIS and the nearest neighbors method, reveal severe contamination: Arsenic and Lead levels exceed regulatory limits by up to 27 and 38 times, respectively. Given the magnitude of these excesses, it is concluded that conventional water treatment methods are insufficient.

Keywords: heavy metals; Pollutants; Ilopango lake; water samples; X-ray fluorescence.

Introducción

El Lago de Ilopango es una cuenca de origen volcánico que abarca una extensión superficial de 72 km². Sus dimensiones aproximadas son de 8 km por 11 km, alcanzando una profundidad máxima de 230 metros (Escalante & Rivas, 2014), lo que lo convierte en el lago más grande de El Salvador. El lago provee de diferentes servicios como la recarga de acuíferos y el almacenamiento de agua, control de inundaciones, producción pesquera, turismo y recreación (Arévalo & Castañeda, 2012). El estado actual del Lago de Ilopango está condicionado por diversos factores externos. El uso de agroquímicos en cultivos locales genera una contaminación por escorrentía que afecta directamente al agua, sumado a las descargas de origen industrial. Asimismo, el cambio de uso de suelo para el desarrollo de complejos habitacionales y turísticos ha reducido la cobertura vegetal original, incrementando la presión sobre los recursos naturales de la cuenca (Escalante & Rivas, 2014). A pesar de que ANDA ha iniciado procesos para el aprovechamiento del Lago de Ilopango como fuente de agua potable, existe una brecha en la disponibilidad de datos técnicos. Aunque la institución ha monitoreado elementos químicos contaminantes en años recientes, la ausencia de difusión pública de estos resultados restringe el análisis científico sobre las consecuencias ambientales y sanitarias que afectan a la cuenca (Bundschuh et al., 2008).

Investigaciones publicadas en 2008 sobre la calidad del agua en El Salvador documentaron la presencia de metales pesados en diversos ecosistemas lánticos, incluyendo los lagos de Ilopango y Coatepeque, así como la laguna de Olomega. Dichos hallazgos confirmaron que el arsénico es un contaminante recurrente y extendido en la mayoría de estos cuerpos de agua continentales (Bundschuh et al., 2008; López et al., 2009).

En 2008 se publicaron resultados de la presencia de algunos metales en el lago de Ilopango, lago de Coatepeque y la laguna de Olomega, también en El Salvador, los resultados revelan la presencia de arsénico en la mayoría de estos cuerpos de agua (Bundschuh et al., 2008; López et al., 2009), generada presumiblemente, por la interacción con fluidos orgánicos hidrotermales, debido a la naturaleza volcánica de la región.

Los niveles de Arsénico reportados superan los parámetros internacionales de seguridad, sobrepasando los 0.05 mg/L (normativa europea) y los 0.01 mg/L recomendados por la OMS y la EPA (Gómez Escoto & Orellana, 2025). El riesgo de exposición es elevado para los pobladores locales, quienes utilizan el agua del lago de forma directa para fines domésticos y de subsistencia económica, incluyendo la agricultura y la pesca.

Para la cuantificación elemental de las muestras de agua, se utilizó la técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF) (Stonach, 2005), la cual permite determinar concentraciones mediante el análisis espectral y el uso de un 'estándar interno' (Ruiz, 2010). La evaluación del grado de contaminación se fundamentó en el Reglamento (UE) 2016, que define los límites permisibles para el consumo humano y actividades agropecuarias (Reyes et al., 2016). Complementariamente, se empleó el software QGIS3 y el método de análisis de vecinos más próximos para mapear los gradientes de concentración de los metales pesados más abundantes detectados durante el muestreo

Metodología

Localización y recolección de muestras

El proceso de recolección consistió en un muestreo simple realizado en ocho puntos estratégicos del Lago de Ilopango, los cuales fueron georreferenciados mediante GPS para su posterior cartografía en el software QGIS. La selección de estos sitios de control se basó en los criterios de inclusión establecidos previamente en la evaluación de calidad de agua desarrollada en 2015 (Mena, 2015).

Las muestras se recolectaron en la mañana, para cada uno los ocho puntos determinados, tanto en superficie como a 20m de profundidad, empleando un muestreador de profundidad tipo Van Dorn, de 5 litros. Las muestras se recolectaron en botellas de 500 ml de polietileno preservadas con ácido nítrico (HNO_3) con un pH aproximado de 2 (INECC-CCA, 2010). Luego de recolectar las muestras, se almacenaron a una temperatura cercana al 4°C, hasta ser llevadas al laboratorio para el procedimiento analítico (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

Pretratamiento de las muestras

Para el análisis químico, se prepararon tres analitos por cada muestra recolectada.

El procedimiento consistió en transferir 1 ml de la muestra a un vial de 15 ml, adicionando 5 μL de Galio (100 mg/L) como estándar interno. Finalmente, se tomó una alícuota de 10 μL de esta mezcla y se depositó sobre un reflector acrílico para su posterior medición (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

Procedimiento analítico

Para determinar la composición metálica de las muestras, se empleó la técnica TXRF mediante un espectrómetro S2-PICOFOX. El dispositivo integra un detector semiconductor tipo SDD con una resolución energética menor a 160 eV y una fuente de excitación de 50 W, características técnicas que aseguran una alta sensibilidad en la detección de los analitos en solución (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

Análisis cualitativo

Se obtuvieron los espectros usados para la determinación cualitativa de los elementos presentes en la muestra, identificables por arriba del límite de sensibilidad del equipo. Dichos espectros fueron exportados al programa AXIL en formato .ASC para luego ser convertidos al formato de análisis .SPE que es el formato que necesita AXIL; los archivos con formato SPE necesitan ser precalibrados y para ello se identifica las líneas de emisión de elementos como el arsénico y el molibdeno, la $K\alpha$ del molibdeno que proviene del tubo de rayos X y $K\alpha$ del arsénico que por lo regular casi siempre está presente en agua; se hace un ajuste del espectro que genera un archivo con extensión .ASR, que contiene toda la información estadística y física de las líneas características que se detectaron en la deconvolución del espectro. El valor del área bajo la curva del pico ajustado con la deconvolución Gaussiana para cada línea de cada elemento analizado debe ser positivo y mayor a 3 veces el valor de la desviación estándar, para una identificación cualitativa de cada elemento. El valor individual de Chi Cuadrado generado

Evaluación de la presencia y concentración de metales pesados en las aguas del Lago de Ilopango, El Salvador

en la estadística del proceso de ajuste Gaussiano debe ser menor a 10 (idealmente 3, para garantizar el mejor ajuste) (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

En general las áreas de los picos que resultaron negativos no fueron tomadas en cuenta para la cuantificación. En la Tabla 1 se muestran los puntos de recolección con sus respectivas coordenadas.

Tabla 1. Puntos de recolección de muestras

Estaciones	Frente a	Coord. N	Coord. W
E1	Comunidad San Agustín	13°41'54.4"	89°01'0.8"
E2	Corrales de Peces	13°41'54.1"	89°02'17"
E3	Turicentro Apulo	13°41'45.7"	89°04'27.2'
E4	Desembocadura Río Chagüite y Joya Grande	13°40'14.3"	89°05'1.3"
E5	Cerros Quemados	13°40'8.2"	89°0259.5"
E6	San Juan Tepezontes	13°38'45.3"	89°02'20.1"
E7	Desagüe del Lago al Río Jiboa	13°39'59.9"	89°00'38.3
E8	Santiago Texacuangos	13°39'12.6"	89°04'13.9"

Análisis cuantitativo

Con el programa AXIL, del Organismo Internacional de Energía Atómica, por el método de regresión de tasas de recuento versus concentraciones, se obtiene un archivo con extensión .ARP que contiene la concentración de cada elemento de interés en ppm que para muestras de agua es equivalente a mg/L. La Figura 1, muestra los puntos de muestreo (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

Figura 1. Mapa de los sitios de muestreo del Lago



Nota. Mena (2015).

Resultados y discusión

Los resultados de la tercera campaña confirman que las concentraciones de As y Pb rebasan drásticamente la normativa. En superficie, los picos alcanzaron los 3.1 mg/L, mientras que los valores mínimos resultaron ser 34 y 38 veces superiores a lo permitido. Incluso a profundidad, el agua no es apta para consumo humano al registrar niveles de

hasta 2.7 mg/L. Este patrón de contaminación severa se ha mantenido vigente desde el inicio de los monitoreos en 2021.

Tabla 2. Valores medidos de los diferentes elementos de estudio, obtenidos en la tercera campaña en superficie

Estación	Superficie mg/L		
	Cr	As	Pb
E1	17±2	2.4±0.2	2.9±0.3
E2	13±1	1.7±0.2	2.1±0.2
E3	10±1	2.2±0.2	2.6±0.2
E4	13±2	3.1±0.3	3.1±0.3
E5	12±1	1.8±0.2	1.9±0.2
E6	8±1	1.9±0.2	2.5±0.2
E7	11±1	2.4±0.2	2.9±0.2
E8	9±1	2.5±0.2	2.9±0.3

Tabla 3. Concentraciones de elementos de estudio, obtenidos en la tercera campaña a 20 m de profundidad

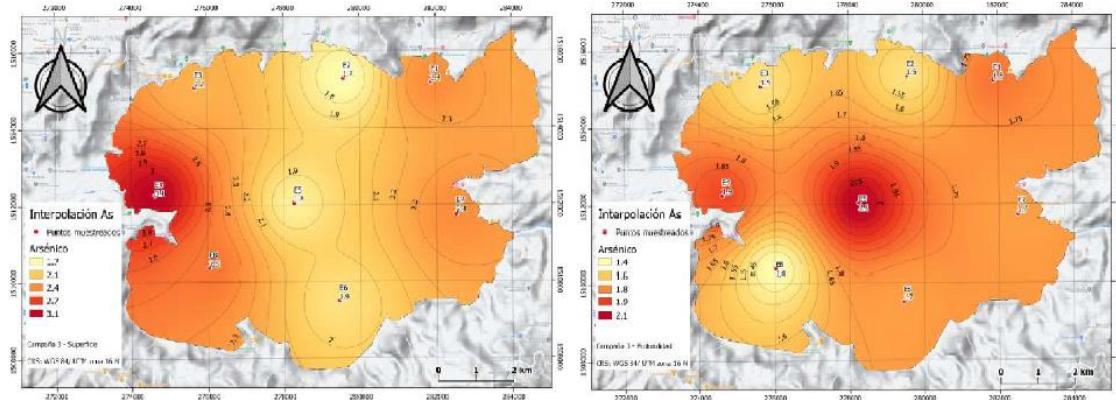
Estación	Profundidad mg/L		
	Cr	As	Pb
E1	7.4±0.8	1.8±0.1	2.4±0.3
E2	9.2±0.9	1.5±0.1	1.3±0.2
E3	6.8±0.8	1.5±0.1	2.3±0.2
E4	8±1	1.9±0.2	2.0±0.1
E5	10±1	2.1±0.2	2.2.±0.2
E6	9±1	1.7±0.2	2.3±0.2
E7	14±1	1.7±0.2	2.7±0.2
E8	10±1	1.4±0.2	2.1±0.2

Gradientes de concentraciones de metales pesados (As y Pb)

Se exponen los gradientes de concentración de Arsénico (As) y Plomo (Pb) obtenidos mediante la interpolación por el método del vecino más cercano en QGIS. Si bien este modelo asume un estado estático del cuerpo hídrico, lo cual simplifica la dinámica real de las corrientes superficiales y de profundidad, el análisis proporciona una aproximación valiosa para entender la dispersión espacial de dichos metales en el lago.

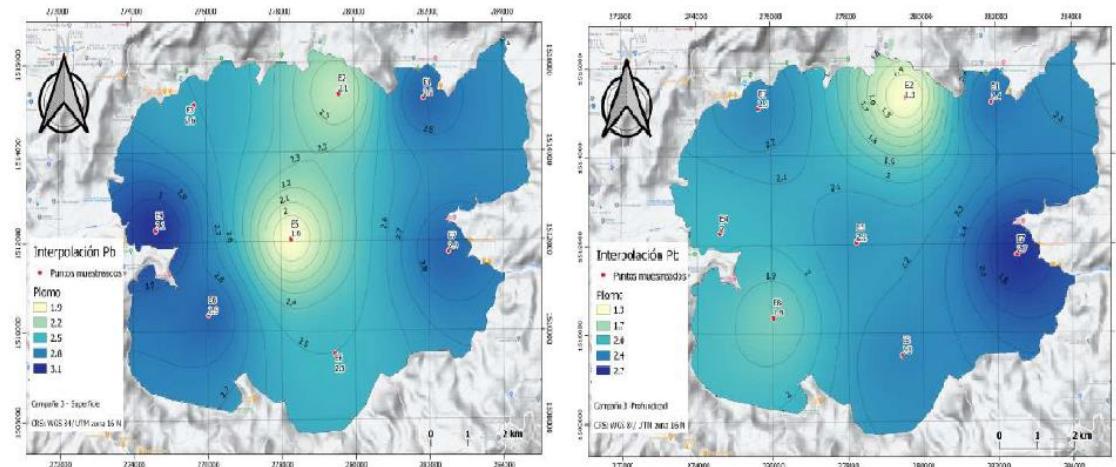
Evaluación de la presencia y concentración de metales pesados en las aguas del Lago de Ilopango, El Salvador

Figura 2. Gradientes de concentraciones de Arsénico de la campaña 3 en superficie y a 20m de profundidad, respectivamente.



Se analizó la presencia de As en el lago de Ilopango en la Figura 2, identificando dos puntos críticos: Cerros Quemados (pico puntual en campaña 3) y la desembocadura del río Chagüite (punto máximo constante). El Arsénico, común en pesticidas y de fácil acumulación en el suelo, supone una grave amenaza a la salud pública por sus efectos carcinogénicos y daños al sistema circulatorio.

Figura 3. Gradientes de concentraciones de Plomo de la campaña 3 en superficie y a 20m de profundidad, respectivamente.



Los resultados muestran un alza en la contaminación por plomo a diferentes profundidades. Si bien este metal es común en la corteza terrestre a nivel de trazas, su abundancia en el Lago de Ilopango se atribuye a la naturaleza volcánica de la región. Investigaciones previas (2008) señalan que la interacción de fluidos hidrotermales es la causa probable de estas concentraciones de metales pesados (Bundschatz et al., 2008).

Conclusiones

Los análisis realizados tanto en la superficie como en las zonas profundas del lago de Ilopango para esta tercera campaña revelan concentraciones críticas de metales pesados, especialmente de Arsénico y Plomo. Esta situación representa una emergencia sanitaria, ya que los niveles detectados superan de forma alarmante los límites internacionales permitidos para los diversos usos del recurso hídrico (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

Los resultados de la investigación permiten determinar que el recurso hídrico del lago es inadecuado para el consumo. La toxicidad derivada de las altas concentraciones metálicas, que superan significativamente el valor guía de 0.05 mg/L, representa un impedimento técnico y sanitario para cualquier proceso de potabilización convencional.

Los hallazgos de **Gómez Escoto y Orellana (2025)** de la campaña 1 y 2 confirman que el recurso hídrico del lago de Ilopango tampoco es apto para fines agropecuarios y como seguimiento al estudio anterior los resultados encontrados en la campaña 3 son similares. Esto se debe a que las concentraciones detectadas de arsénico y plomo sobrepasan los límites de 0.1 mg/L y 0.05 mg/L, respectivamente, lo que compromete la inocuidad de las actividades agrícolas y la cría de ganado en la zona (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

El impacto de la contaminación en el Lago de Ilopango se ve agravado por las actividades de piscicultura presentes en el cuerpo de agua. La capacidad de los organismos acuáticos para concentrar metales tóxicos (arsénico, cadmio, cromo y mercurio) sugiere que la fauna piscícola podría estar actuando como un reservorio de contaminantes, según lo reportado en estudios sobre bioacumulación (Senior et al., 2016), así como por la intensa y variada actividad humana, en las aguas del lago y sus riveras.

Recomendaciones

Se sugiere promover la investigación de materiales biológicos con potencial bioabsorbente para mitigar la presencia de metales pesados. Al aplicar estas estrategias de biorremediación, se fortalecerían los procesos de tratamiento de agua, priorizando la reducción de elementos tóxicos como el arsénico y el plomo en cuerpos hídricos críticos de origen volcánico (Gómez Escoto & Orellana, 2025).

Es fundamental implementar programas de monitoreo continuo en el Lago de Ilopango para determinar la dinámica espacial y temporal de los contaminantes detectados. Asimismo, resulta imperativo cartografiar estos datos de manera sistemática, permitiendo una comprensión profunda de las variaciones en las concentraciones de los metales pesados de interés a lo largo del tiempo.

Investigar a fondo los daños que causa a la salud el consumo de agua en concentraciones de plomo, arsénico y cromo por encima del nivel máximo permisible en zonas aledañas al lago de Ilopango, lago de Coatepeque y la laguna de Olomega, y otros, ya que según estudios publicados en 2008 se revela la presencia de arsénico en la mayoría de los cuerpos de agua de El Salvador (Bundschuh et al., 2008; López et al., 2009).

Referencias

- Arévalo, C., & Castañeda, K. (2012). *Investigación de la presencia de litio por fotometría de llama en muestras de agua provenientes de la zona noroeste de la Isla Chachagaste del lago de Ilopango* [Tesis de grado, Universidad de El Salvador]. Repositorio institucional de la Universidad de El Salvador. <https://n9.cl/1k9ao>
- Bundschuh, J., Pérez, A., & Litter, M. (Eds.). (2008). *Distribución del arsénico en las regiones Ibéricas e Iberoamericana*. CYTED.
- Escalante, S., & Rivas, E. (2014). *Determinación de la presencia de cromo hexavalente en muestras de agua del lago de Ilopango por el método de absorción atómica* [Tesis de grado, Universidad de El Salvador]. Repositorio institucional de la Universidad de El Salvador. <https://n9.cl/8r2ggo>
- Escoto, R. A. G., & Orellana, M. T. (2025). *Determinación de contaminación por metales pesados en muestras de agua superficial y de profundidad del lago de Ilopango, El Salvador*. Revista Minerva, 8(1), 31-39.
- INECC-CCA (2010). *Manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias prioritarias para las matrices del PRONAME*. Laboratorios ABC.
- López, D. L., Ransom, L., Monterrosa, J., Soriano, T., Barahona, F., Olmos, R., & Bundschuh, J. (2009). Volcanic pollution of arsenic and boron at Ilopango Lake, El Salvador. En *Natural arsenic in groundwaters of Latin America*. A.A. Balkema (pp. 129-143). Taylor and Francis.
- Mena, Z. (2015). *Evaluación de la calidad del agua, lago de Ilopango*. Dirección General del Observatorio Ambiental.
- Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (1995). Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jiménez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Ruiz, R. F. (2010). Fluorescencia de rayos x por reflexión total (TXRF): Una gran desconocida. *An. Quím. Real Sociedad Española de Química*, 106(1), 5-12.
- Senior, W., Cornejo, M. H., Tobar, J., & Ramírez, M. (2016). Metales pesados en organismos marinos en las costas de Ecuador. *Zootecnia Trop.*, 34(2), 143-156.

- Stonach, H. (2005). Environmental trace-element analysis using a benchtop total reflection x-ray fluorescence spectrometer. *Analytical Science*, 21(7), 873-876. Universidad de El Salvador.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, Á., & Garcés-Jaraba, L. (2014). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnología*, 18(34), 109-123.
- Vera, L. M., Uguña, M. F., García, N., Flores, M., Vázquez, V. E. (2016). Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, 73(573), 43-49.