

Distribución Espacial de Metales Pesados de Origen Antropogénico en la Subcuenca del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala Spatial Distribution of Heavy Metals from Anthropogenic Origin, in the Sub Basin of the Alto Balsas, Puebla, and Tlaxcala

Jonathan Torres-Rosique¹ , José Víctor Tamariz-Flores^{2†} ,
Numa Pompilio Castro-González³ , Rosalía Castelán-Vega¹ y
Gabriela Pérez-Osorio¹

¹ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Posgrado en Ciencias Ambientales; (J.T.R.), (R.C.V.), (G.P.O.). ² Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas; (J.V.T.F.). Calle SIU, esquina con Calle Biblioteca, Boulevard Valsequillo, Ciudad Universitaria, Colonia Jardines de San Manuel. 72570 Puebla, Puebla, México.

[†] Autor para correspondencia: jose.tamariz@correo.buap.mx

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias. Av. Reforma 165, Colonia Centro. 73900 Tlatlauquitepec, Puebla, México; (N.P.C.G).

RESUMEN

En la zona metropolitana de Puebla y Tlaxcala la descarga de residuos hacia la subcuenca del Alto Balsas constituye una problemática ambiental en aumento en los últimos años, debido a la ampliación de asentamientos urbanos, esto genera riesgos a la salud derivados del consumo y utilización de agua contaminada para riego. El objetivo es evaluar la contaminación por metales pesados en suelos y aguas superficiales utilizadas para la producción agrícola y ubicar las fuentes de contaminación potenciales, a través de un análisis espacial de la concentración de metales pesados. El estudio se llevó a cabo en tres zonas representativas de la subcuenca, obteniendo muestras de agua y suelos, se obtuvo el índice de geoacumulación (*Igeo*) y el factor de enriquecimiento (FE); y se realizó un análisis de distribución espacial de metales pesados mediante la técnica IDW para la interpolación. Los resultados muestran que los promedios de Cd, Co, Cr y Ni están por encima de las recomendaciones de la U.S. EPA para agua de riego, mientras que los valores de Cr superaron los límites máximos para suelos agrícolas. El *Igeo* mostró una contaminación fuerte a moderada para las concentraciones de Cd, Co y Zn, en tanto que la contaminación por Cr, Cu y Ni fue moderada. El FE presentó un enriquecimiento significativo para los elementos como Cd, Co, Cr, Cu y Zn mostrando que la contaminación está relacionada con fuentes antropogénicas. A partir de la distribución espacial fue posible identificar que la contaminación por metales pesados se relaciona con la creciente expansión urbana e industrial en la región del Alto Balsas. La falta de regulación de las descargas de desechos ha contribuido a la acumulación de metales pesados, generando contaminación sobre los suelos agrícolas.

Palabras clave: contaminación de suelos, factor de enriquecimiento, índice de geoacumulación, interpolación IDW.

SUMMARY

In the metropolitan area of Puebla and Tlaxcala, waste discharge into the Alto Balsas sub basin constitutes an environmental issue that has increased throughout recent years due to the expansion of urban settlements, causing health issues derived from consumption and irrigation water use. The objective was to evaluate heavy metal contamination in soils and surface water used for agricultural production and to conduct a spatial analysis of heavy metals locating the potential sources of contamination. The study was carried out in three representative areas of the sub-basin, collecting water and soil samples. The geoaccumulation index (*Igeo*)



Cita recomendada:

Torres-Rosique, J., Tamariz-Flores, J. V., Castro-González, N.P., Castelán-Vega, R., & Pérez-Osorio, G. (2025). Distribución Espacial de Metales Pesados de Origen Antropogénico en la Subcuenca del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-13. e2153. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2153>

Recibido: 31 de octubre de 2024.
Aceptado: 2 de abril de 2025.
Artículo. Volumen 43.
Septiembre de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Ayala Niño

Editor Técnico:
Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

and enrichment factor (EF) were obtained, and the spatial distribution analysis for heavy metals was made by interpolation using the IDW method. The results showed median concentrations of Cd, Co, Cr, and Ni above the U.S. EPA recommendations for irrigation water-use. Cr values exceed the maximum levels for agricultural soil-use. The *Igeo* showed strong to moderate contamination in concentrations of Cd, Co, and Zn elements, while Cr, Cu, and Ni resulted in moderate contamination. The EF showed significant enrichment for elements such as Cd, Co, Cr, Cu, and Zn, proving that the contamination is related to anthropogenic sources. From the spatial distribution, it is possible to identify the contamination sources of heavy metals, associating the causes with the increasing urban areas and the industrial growth in the Alto Balsas region, which, due to the lack of regulation for waste discharges contributes to the accumulation of heavy metals, generating pollution in agricultural soils.

Index words: soil contamination, enrichment factor, geoaccumulation index, IDW interpolation.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la expansión urbana se ha convertido en un proceso frecuente en ciudades de América Latina, debido al alto crecimiento poblacional y desarrollo económico (Hidalgo y Zunino, 2011). La urbanización se trata del remplazo de cubiertas naturales o seminaturales por superficies artificiales destinadas para mejorar la calidad de vida de la población (Concepción, 2022); sin embargo, la urbanización ocurre a expensas de los terrenos de cultivo y la degradación de los recursos naturales (Ibáñez-Álamo y Molina, 2022).

A medida que los límites urbanos se expanden, rápidamente se invaden tierras de cultivos, representando amenaza para la calidad del suelo y seguridad alimentaria (Davies y Hall, 2010); además, disminuye la disponibilidad de recursos y aumenta la degradación de los ecosistemas naturales, limitando los procesos ecológicos y de producción agropecuaria (Grimm, 2008).

En México, el crecimiento urbano se ha realizado de manera irregular y progresivo generando sobrexplotación y contaminación de los recursos hídricos (Quiroz-Rothe y Alcántar, 2017; Ramírez, Guevara y Hernández, 2019), lo cual reduce el agua disponible para uso agrícola, potable o de consumo para animales (Ibarrarán, Mendoza, Pastrana y Manzanilla, 2017). En el 2006, Comisión Nacional de Agua y el Fondo para la Educación Ambiental estimaron que 74% de las aguas superficiales presentaban algún grado de contaminación (CONAGUA, 2006, FEA, 2006); para 2016, 80% de los cuerpos de agua del país presentó un tipo de contaminación por descargas industriales y desechos urbanos (López-Morales *et al.*, 2017).

En la zona metropolitana de Puebla y Tlaxcala, la descarga de residuos de origen doméstico y público hacia la subcuenca del Alto Balsas constituye una problemática ambiental debido a la ampliación de grandes asentamientos urbanos (López y Montalvo, 2015). Además, los desechos industriales de tipo textil, químicos y metalúrgicos generan contaminación de metales pesados y otras sustancias químicas tóxicas a través del afluente (Cortés-Hernández, 2021). Estudios realizados en la subcuenca han identificado posibles riesgos de cáncer, malformaciones congénitas y fallos renales derivados del consumo y utilización de agua para riego (Castro-González, Calderón, Moreno, Moreno y Tamariz, 2017; Handal-Silva, Pérez, Morán y García, 2017; Pérez-Castresana *et al.*, 2019; Mora *et al.*, 2021).

Debido al alto crecimiento urbano y a la expansión de zonas industriales en la subcuenca del Alto Balsas, los objetivos de la presente investigación fueron evaluar la contaminación por metales pesados en los suelos y aguas superficiales utilizadas para la producción agrícola y realizar un análisis espacial de la concentración de metales pesados para ubicar los sitios de mayor concentración en la subcuenca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la subcuenca del Alto Balsas, que se localiza parcialmente en el área metropolitana de los estados de Puebla y Tlaxcala, extendiéndose entre los paralelos 19° 42' 10.82" y 18° 51' 42.27" N, y 97° 57' 34.07" y 98° 17' 43.23" O (INEGI, 2019). El área de estudio se dividió en tres zonas tomando como criterio los sitios de alto, mediano y bajo impacto por contaminantes antropogénicos como: desechos domésticos, agrícolas e industriales, considerados como fuente importante de contaminación por metales pesados en sus efluentes. Estas áreas se seleccionaron después de realizar un estudio preliminar presentando características homogéneas en cuanto a sus fuentes hídricas, tipos de cultivos y actividad industrial.

La zona I es representada por los municipios de Tlaxcala y San Damián Texoloc dependientes del río Zahuapan. La zona II, a través del río Atoyac entre los municipios de Ixtlacuixtla de Mariano Matamoros y Tepaltitla de Lardizabal en el estado de Tlaxcala. La zona III, municipio de Huejotzingo en la junta auxiliar de Santa Ana Xalmimilulco donde se colectaron muestras en los ríos Xochiac y Xopanac, afluentes del río Atoyac (Figura 1).

Muestreo

Se establecieron tres zonas representativas con 15 puntos de muestreo de agua colectando un total de 90 muestras durante el periodo de marzo 2022 a septiembre 2023. Las muestras se colectaron en botes de polietileno con capacidad de un litro previamente lavados en 5% de ácido nítrico y enjuagados con agua desionizada, e inmediatamente se trasladaron al laboratorio para realizar la digestión. Adicionalmente, se tomaron 48 muestras compuestas de suelo, a profundidad de 30 cm para representar 16 parcelas destinadas a la producción agrícola irrigadas con afluentes de la subcuenca del Alto Balsas. Las muestras fueron almacenadas en bolsas de plástico, como lo indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), secadas a temperatura ambiente, tamizadas y resguardadas para su análisis.

Digestión

El método de extracción de metales en agua y suelos se realizó mediante el procedimiento de digestión ácida por microondas siguiendo la metodología establecida por U.S. EPA Method-3015A para muestras acuosas y Method-3051A digestión para sedimentos, suelos, lodos y aceites (U.S. EPA, 2007a; 2007b). Para las muestras de agua se utilizaron 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) en 45 mL de muestra, para el caso de la digestión en suelos se pesaron 0.5 g de muestra mezclándolos en 10 mL de HNO_3 . Una vez preparada la mezcla en tubos de teflón, se colocaron las muestras en el microondas de la marca CEM Mars-X. Posterior a la digestión, las muestras fueron filtradas utilizando papel de grado 42 (Whatman), aforando a 50 mL con agua destilada.

Determinación de Metales Pesados

Las concentraciones de los elementos, bario (Ba), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V) y zinc (Zn) se determinaron a través de espectrometría de emisión óptica de acoplamiento inductivo (ICP-OES) que se trata de una técnica ampliamente utilizada para determinar metales traza en soluciones acuosas. Se siguieron los procedimientos de la norma oficial mexicana NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2004, 2007) y la metodología 6010D de la U.S. EPA (2018). Las condiciones de funcionamiento y los parámetros de medición del ICP-OES se realizaron de acuerdo con las especificaciones del equipo ICP-OES Varian-730.

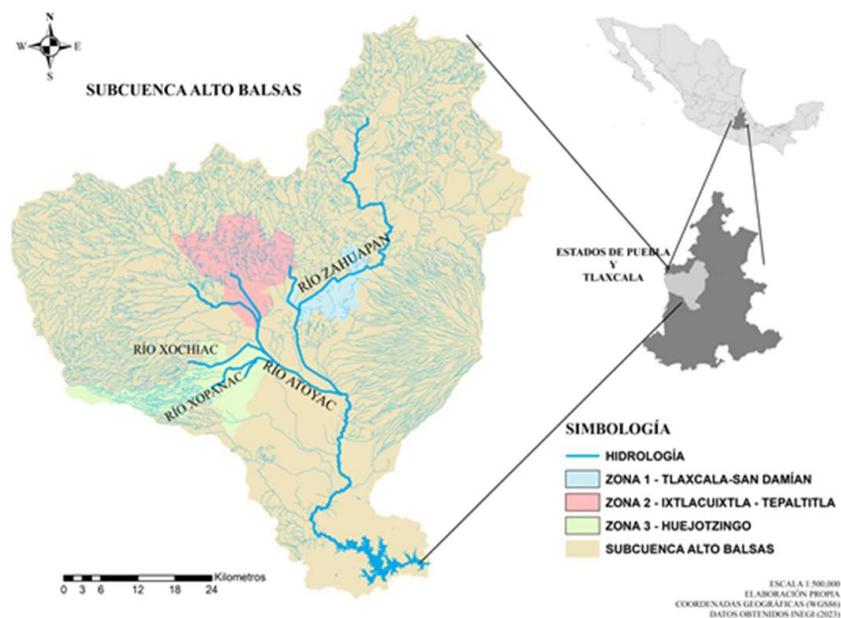


Figura 1. Mapa subcuenca del Alto Balsas y zonas representativas del área de estudio.
Figure 1. Alto Balsas Sub basin and representative study areas.

Los resultados obtenidos de las muestras de agua se promediaron y compararon con los límites máximos de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2022) que establece los límites máximos de contaminantes en las descargas de aguas residuales y las recomendaciones sobre la calidad de agua para irrigación establecidas por la U.S. EPA (2012). Así mismo para suelos, se compararon las concentraciones de referencia de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007) y las normas regulatorias de metales pesados en suelos de la U.S. EPA (2024).

Índice de Geoacumulación

El índice de geoacumulación (*Igeo*) propuesto por Muller (1969, 1986) permite determinar el grado de contaminación del suelo por metales pesados, comparando las concentraciones actuales con los niveles preindustriales, se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

Donde C_n es la concentración de los elementos obtenidos en la muestra; B_n es el valor de fondo o de referencia, siendo la concentración geoquímica del metal; 1.5 es un valor constante que está diseñado para las fluctuaciones en el valor de fondo causadas por diferencias de roca y otros factores (Atiemo *et al.*, 2011). De acuerdo con Muller (1986), los resultados del *Igeo* se clasifican en siete categorías que se presentan en el Cuadro 1.

Factor de Enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento permite identificar si las concentraciones de los metales provienen de actividades antropogénicas u origen natural, se calcula utilizando la siguiente fórmula utilizada por diversos autores (Barbieri, 2016; Chabukdhara, Munjal, Nema, Gupta y Kaushal 2016; Castro-González, Calderón, Moreno, Tamariz y Reyes, 2019; Sappa, Barbieri y Andrei, 2020).

$$FE = \frac{C_n / C_{n\ ref}}{B_n / B_{n\ ref}} \quad (2)$$

Donde C_n es la concentración del metal en la capa superior del suelo, refiriendo a las muestras analizadas. B_n es la concentración del elemento de referencia en el suelo, se obtuvo a partir de los valores establecidos por la U.S. EPA (2024). *REF* es el valor del metal adoptado como "Referencia", es decir, aquel elemento cuyo contenido en las muestras proviene de la corteza terrestre, comúnmente hace referencia al contenido del ambiente no afectado por las actividades humanas (Aytop, Koca y Şenol, 2023). Los elementos de referencia más comunes en la literatura son aluminio (Al), hierro (Fe), titanio (Ti) y manganeso (Mn) (Awagu y Uduma, 2014; Aung, Htwe y Ko, 2018). En este estudio se utilizaron valores de referencia de Mn (500 mg kg⁻¹, U.S. EPA, 2024), ya que se trata de un elemento particularmente estable en el suelo y de presencia abundante en suelos (Awagu y Uduma, 2014; Sappa *et al.*, 2020). Mediante el FE se determina el estado de calidad del suelo a través de 5 categorías (Cuadro 2).

Cuadro 1. Clases del índice de geoacumulación de acuerdo con los niveles de contaminación.
Table 1. Geoaccumulation index classes according to the level of pollution.

Clase	Valor <i>Igeo</i>	Grado de contaminación
0	$I_{geo} \leq 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	Moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	Fuertemente a muy fuertemente contaminado
6	$I_{geo} \geq 5$	Muy fuertemente contaminado

Cuadro 2. Categorías del factor de enriquecimiento (FE) de acuerdo con los niveles de contaminación. Table 2. Enrichment factor (EF) categories according to the level of pollution.

Categoría	Valor FE	Grado de enriquecimiento
0	FE < 2	Deficiente a enriquecimiento mínimo
1	2 < FE < 5	Enriquecimiento moderado
2	5 < FE < 20	Enriquecimiento significativo
3	20 < FE < 40	Enriquecimiento muy alto
4	FE > 40	Enriquecimiento muy extremo

Análisis de Distribución Espacial

Se realizó un análisis de distribución espacial evaluando las concentraciones de los metales pesados (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) permitiendo identificar los patrones de distribución en las zonas de estudio. Para determinar los puntos críticos de la contaminación de los metales seleccionados, se utilizó una técnica de interpolación para estimar parámetros geoespaciales desconocidos. La técnica realizada a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es la interpolación de tipo "Inverse Distance Weighting" (IDW), se trata de un método de precisión que predice valores no medidos según la distancia de impacto, los puntos de muestra se ponderan durante la interpolación de modo que la influencia de un punto en relación con otro disminuye con la distancia (Ouabo, Sangodoyin y Ogundiran, 2020), a medida que aumenta la intensidad del coeficiente de ponderación, más extenso será el rango de impacto y mayor será el rango de predicción del área contaminada (Zhao, Liu, Qiao y Wu, 2021). Se mide a través de la siguiente fórmula.

$$Z_o = \frac{\sum_{i=1}^N z_i d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-n}} \quad (3)$$

Donde: Z_o : es el coeficiente de ponderación, z_i : se trata del valor que representa la muestra en un punto determinado, un punto "i". d_i : es la distancia entre la ubicación de la muestra y la estimación. n : la potencia de ponderación que especifica cómo se reduce el peso a medida que aumenta la distancia. En este estudio se empleó la exponencial a la potencia 2. N : representa el número total de predicciones producidas para cada evento de validación.

Análisis Estadístico y SIG

Los resultados se evaluaron utilizando el paquete Statgraphics v16.1 (Statgraphics Technologies, 2013) y Microsoft Excel Version 2301, donde fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias para cada zona de muestreo fue mediante la prueba paramétrica de Tukey. Para el análisis de distribución espacial se utilizó el programa ArcGIS 10.8 (ESRI, 2019), empleando extensiones de análisis espacial y análisis geoestadístico para obtener el grado de distribución espacial de los metales pesados mediante IDW para la interpolación optimizando los rangos de concentración de los mapas según su desviación estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de Agua

En la zona III se encontraron las concentraciones más elevadas de Cu, Pb, V y Zn, mostrando diferencias significativas para estos valores en los ríos de la subcuenca del Alto Balsas (Cuadro 3). Las concentraciones promedio de Cd, Co, Cr y Ni estuvieron por encima de las recomendaciones de la U.S. EPA (2012) para agua de riego. Los contenidos de Cr y Co en aguas pueden estar relacionados con la fuerte actividad industrial textil en la zona de estudio, Lokhande, Singare y Pimple (2011) y Kawakami, Isama y Ikarashi (2020) mencionan que compuestos de Cr y Co se utilizan como pigmentos, fijadores y colorantes, generando alta concentración de estos metales en ríos con dicha actividad industrial. A su vez, Genchi, Sinicropi, Lauria, Carocci y Catalano (2020)

Cuadro 3. Concentraciones medias de metales pesados en ríos de la subcuenca del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala.
Table 3. Median concentration of heavy metals in water bodies of the Alto Balsas sub basin, Puebla, and Tlaxcala.

Zonas representativas	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
	----- mg L ⁻¹ -----								
Zona I	0.11±0.01 a*	0.03±0.06 a	0.76±0.34 a	0.41±0.49 b	0.02±0.0036 a	0.27±0.1 a	0.31±0.99 a	0.03±0.01 a	0.12±0.05 a
Zona II	0.11±0.02 a	nd	0.53±0.47 a	0.03±0.01 a	0.02±0.01 a	0.29±0.06 a	0.02±0.04 a	0.02±0.01 a	0.1±0.03 a
Zona III	0.19±0.19 a	0.04±0.1 a	0.82±0.37 a	0.04±0.02 a	0.04±0.01 b	1.21±2.28 b	2.98±7.92 b	0.05±0.02 b	0.25±0.12 b
U.S. EPA (2012) [†]	-	0.01	0.05	0.1	0.2	0.2	5.0	0.1	2.0
NOM-001-SEMARNAT-2021 [‡]	-	0.1	-	1.0	6.0	4.0	1.0	-	20.0

* Medias con letras iguales indican que no existe diferencia significativa (Tukey $P \leq 0.05$). nd = no detectado. \pm = indica la desviación estándar. [†] U.S. EPA = directrices para la reutilización de agua, recomendaciones para la calidad de agua para irrigación. [‡] NOM-001-SEMARNAT-2021 = norma oficial mexicana, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores de la nación.

* Means with the same letter indicate that there is no significant difference. (Tukey $P \leq 0.05$). nd = not detected. \pm = indicates the standard deviation. [†] U.S. EPA = guidelines for water reuse, recommended water quality criteria for irrigation. [‡] NOM-001-SEMARNAT-2021 = Mexican official standards, that establishes the permissible limits for pollutants in wastewater discharge into water bodies.

relacionan la presencia de Cd en ríos con la actividad metalúrgica, también presente en la zona de estudio, debido a que el Cd se utiliza en procesos de revestimiento, pintura y galvanizado en metales y aceros. La concentración de metales a través del Alto Balsas no solo se reduce a la actividad industrial, también puede estar ligado al vertido de residuos domésticos y agrícolas sin tratar, Al-Zaiadi y Jarallah (2023) mencionan que estos vertidos generan un aumento en concentraciones de metales contaminantes como Cd, Ni y Pb en agua de ríos.

Análisis del Suelo

En el Cuadro 4 se observan las concentraciones promedio de metales pesados en suelos agrícolas irrigados por agua provenientes del Alto Balsas, comparando los resultados con las concentraciones de referencia de la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007) y las normas regulatorias de metales pesados y detección de contaminantes en suelos de la U.S. EPA (2024).

Las Normas Oficiales Mexicanas no establecen intervalos de referencia para elementos como cobalto, cobre y zinc, para el resto de los elementos analizados en el estudio, ninguno se encuentra por arriba de la norma mexicana. De acuerdo con la norma regulatoria de la U.S. EPA, en todas las zonas representativas los valores de cromo superan los límites máximos para suelos agrícolas; sin embargo, la concentración del resto de elementos no supera la norma regulatoria de la U.S. EPA (2024) y la SEMARNAT (2007). Delgado *et al.* (2014), mencionan que concentraciones elevadas de cromo pueden estar relacionadas al tipo de formación geológica de tipo volcánica, misma que se presenta en la zona de estudio, esta formación se meteoriza y erosiona con el tiempo dando lugar a suelos contaminados por cromo; sin embargo, autores como Ao *et al.*, (2022) y Ali *et al.*, (2023) establecen que la principal fuente de contaminación por cromo se relaciona con residuos de la industria metalúrgica y química.

Las propiedades químicas de la zona II favorecen elevadas concentraciones de metales pesados, presentando pH promedio de 7.8 con valores máximos de 8.2 y 7.1 mínimo (Cuadro 5). Además de presentar las mayores concentraciones promedio de C I C y M O de 12.59 C_{mol} kg⁻¹ y 2.98% respectivamente. La influencia de estas propiedades químicas determina la toxicidad de un agente contaminante. Por ejemplo, la concentración de metales puede relacionarse con el pH y la CIC, ya que son factores que influyen en la biodisponibilidad y el transporte de metales contaminantes a través del suelo y agua (Chaoua, Boussaa, El Gharmali y Boumezzough, 2018). La movilidad de los metales disminuye con el aumento del pH en el suelo debido a la precipitación de hidróxidos, carbonatos o la formación de complejos orgánicos insolubles (Smith y Giller, 1992). También, las texturas arcillosas y la materia orgánica favorecen al adsorber los metales pesados, quedando retenidos en las partículas del suelo y en los elementos orgánicos, por contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación, en los cuales los metales se infiltran y percolan al subsuelo contaminando los mantos freáticos (Prieto-Méndez, González, Román y Prieto, 2009). Por su parte, García-Carrillo *et al.* (2020) en un estudio donde evaluaron el impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo, concluyen que, la utilización de agua residual cruda modifica negativamente las propiedades físico-químicas e incrementa metales pesados en los primeros estratos del suelo.

Cuadro 4. Concentraciones medias de metales pesados en suelos irrigados con aguas pertenecientes a la subcuenca del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala.**Table 4. Median concentration of heavy metals in irrigated soils from waters of the Alto Balsas sub basin, Puebla, and Tlaxcala.**

Zonas representativas	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----								
Zona I	162.1±41.27 c*	3.33±0.19 b	6.23±0.6 b	29.45±5.1c	14.47±2.62 b	19.48±1.97 b	19.69±6.76 a	34.93±7.24 c	53.15±5.64 b
Zona II	91.15±43.65 b	3.32±0.16 b	9.51±0.75 c	20.02±5.9 b	13.05±1.81 b	18.31±2.28 b	65.83±6.26 b	25.89±8.76 b	28.28±16.74 a
Zona III	64.67±28.87 a	2.45±0.61 a	3.35±2.48 a	13.9±6.39 a	9.36±2.95 a	7.52±6.74 a	20.07±18.12 a	14.98±7.07 a	47.52±8.03 b
U.S. EPA (2024) [†]	200	10	20	11	100	50	200	-	1100
NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 [‡]	5400	37	-	280	-	1600	400	78	-

* Medias con letras iguales indican que no existe diferencia significativa (Tukey $P \leq 0.05$). \pm = indica la desviación estándar. [†] U.S. EPA = normas regulatorias de metales pesados y detección de contaminantes en suelos. [‡] NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 = norma oficial mexicana, que establece criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio.

* Means with the same letter indicate that there is no significant difference. (Tukey $P \leq 0.05$). \pm = indicates the standard deviation. [†] U.S. EPA = standards and regulation for heavy metals in soil. [‡] NOM-001-SEMARNAT/SSA1-2004 = Mexican official standards, that establishes the criteria for remediation, determining concentrations of polluted soils by arsenic, barium, beryllium, cadmium, hexavalent chromium, mercury, nickel, silver, lead, selenium, thallium and vanadium.

Distribución Espacial

En la Figura 2 se muestran los mapas de la distribución de la concentración de los metales pesados en suelos y aguas de las zonas de estudio a partir del análisis IDW.

Se identificaron similitudes en el patrón de distribución espacial en aguas del Ba, Co, Ni, V y Zn, representados en las Figuras 2a, 2c, 2f, 2h y 2i. Las mayores concentraciones de estos elementos se observaron en la zona 3, Huejotzingo; sin embargo, en esta misma zona se presentaron los valores de concentración más bajos en suelos. Por el contrario, los resultados observados para las zonas I y II pasaron de tener las concentraciones más bajas en agua, a tener las más elevadas en suelos. Kunhikrishnan et al. (2012) mencionan que puede estar relacionado con estado de acumulación en suelos, ya que, con el paso de los años el riego con aguas contaminadas tiene el potencial de causar que los metales pesados se acumulen progresivamente en los suelos y se vuelvan biodisponibles para los cultivos.

Cuadro 5. Promedio de las propiedades del suelo en las zonas representativas de la subcuenca Alto Balsas.**Table 5. Average soil properties in representative areas of the Alto Balsas sub basin.**

Parámetros	Zonas representativas		
	Zona I	Zona II	Zona III
pH	6.9±0.37 a*	7.8±0.45 b	6.9±0.31 a
CE (dS m ⁻¹)	0.23±0.09 b	0.27±0.08 b	0.08±0.02 a
MO (%)	1.7±0.25 a	2.92±1.62 b	2.25±0.66 a
CIC (Cmol kg ⁻¹)	3.35±0.55 a	12.59±1.42 c	4.7 5±1.79 b
Da (g cm ⁻¹)	1.39±0.04 b	1.19±0.03 a	1.33±0.11 b
Arcillas (%)	11±3.13 a	28±4.63 b	13± 6.03 a
Textura predominante	Franco arenosa	Franco arcillo arenosa	Franco arenosa

* Medias con letras iguales indican que no existe diferencia significativa (Tukey $P \leq 0.05$). \pm = indica la desviación estándar. C.E = conductividad eléctrica; MO = porcentaje de materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; Da = densidad aparente.

* Means with the same letter indicate that there is no significant difference. (Tukey $P \leq 0.05$). \pm indicates the standard deviation. CE = electrical conductivity; MO = organic matter percentage; CIC = cationic exchange capacity; Da = bulk density.

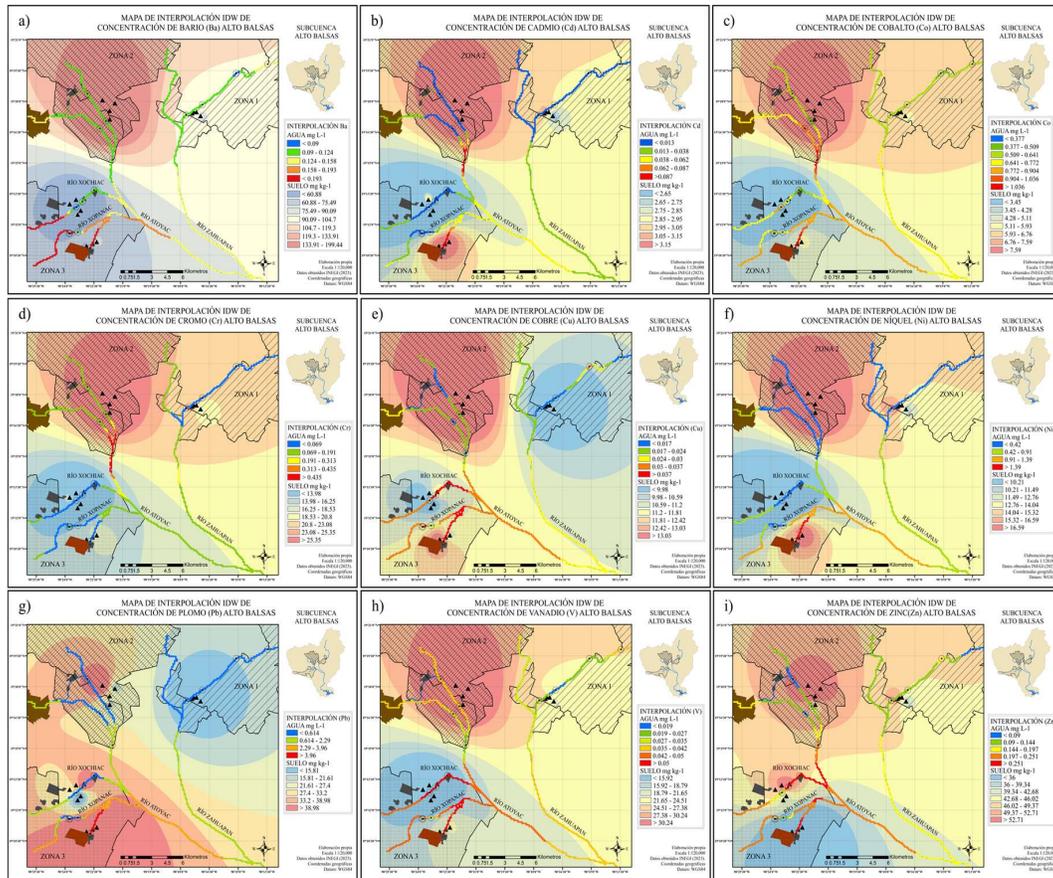


Figura 2. Distribución espacial IDW de metales pesados en ríos y suelos del Alto Balsas. (a) distribución espacial de ba; (b) distribución espacial de cd; (c) distribución espacial de co; (d) distribución espacial de cr; (e) distribución espacial de cu; (f) distribución espacial de ni; (g) distribución espacial de pb; (h) distribución espacial de v; (i) distribución espacial de zn. En suelo; la representación del mapa es de color rojo a azul indicando mayor a menor concentración. En agua; se representan las concentraciones en colores azules, amarillos y rojos, indicando baja, media y alta concentración respectivamente. Se muestran los puntos de muestreo de suelos y aguas, así como las áreas industriales y urbanas en cada zona representativa del estudio.
Figure 2. Heavy metal spatial distribution IDW in water and soil of the Alto Balsas sub basin. (a) spatial distribution of ba; (b) spatial distribution of cd; (c) spatial distribution of co; (d) spatial distribution of cr; (e) spatial distribution of cu; (f) spatial distribution of ni; (g) spatial distribution of pb; (h) spatial distribution of v; (i) spatial distribution of zn. in soil, the map is represented from red to blue, indicating higher to lower concentrations. In water, the concentration of metals is represented in blue, yellow and red, indicating low, medium and high concentrations respectively. The soil and water sampling points are shown, as well as the industrial and urban areas in each representative area of the study.

A partir de la distribución espacial de los metales se pueden identificar las posibles causas de la contaminación. En la zona III se presentaron los valores más elevados de contaminación de aguas, que puede relacionarse con la creciente expansión urbana e industrial en la zona. Desde la década del 2000 la construcción de corredores industriales en esta zona del estado ha ido en aumento, contando en la actualidad con 5 de los 20 parques industriales de todo Puebla, los más recientes datan del 2018 (Ayuntamiento de Huejotzingo, 2019), aunado al crecimiento de asentamientos urbanos construidos en los años 2016 y 2017 (ONU-HABITAT, 2018; Ramón-González y Aguilar, 2021) pueden contribuir a la situación actual de contaminación en los ríos de la zona, ya que se encuentran ubicados a escasos metros de las zonas de cultivo y las fuentes hídricas.

En general, en la zona II, Ixtlacuixtla-Tepaltitla, se identificaron las concentraciones más elevadas de metales de toda el área de estudio, esto se puede atribuir al riego continuo que ha prevalecido durante décadas. Por más de 60 años las zonas industriales y urbanas de San Martín Texmelucan han liberado aguas residuales hacia los ríos del Alto Balsas, contribuyendo en la contaminación de las zonas bajas (Ávila-Orta, Hernández y Lozano, 2021).

Siebe (1994) en un estudio sobre acumulación de Cd, Pb, Cr y Zn introducidos en suelos durante 80 años a través de riego con agua residual, menciona que tienden a acumularse en la capa arable de los suelos y la concentración de estos elementos se habría incrementado en función de los años. Tras más de 60 años de industrialización la acumulación de metales en suelos podría estar relacionada con los efectos a largo plazo por la utilización de aguas residuales para riego provenientes de la zona industrial-urbana de San Martín Texmelucan. Haroon, Ping, Pervez, Faridullah y Irshad (2019) y Oubane, Khadra, Ezzariai, Kouisni y Hafidi (2021) coinciden en el efecto a largo plazo en la concentración total y disponible de metales en suelos irrigados con aguas residuales, además mencionan, que induce a un aumento significativo en la conductividad eléctrica, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes.

Índice de Geoacumulación (*Igeo*)

A través de la evaluación del *Igeo* (Figura 3a) se identificó contaminación fuerte a moderada en concentraciones de elementos de Cd, Co y Zn, elementos como Cr, Cu y Ni, presentan contaminación moderada. En cuanto a los grados de contaminación con relación a las zonas representativas, la zona II presentó algún grado de contaminación para los metales evaluados, exceptuando Ba y V, mientras la zona III presentó los menores grados de contaminación, coincidiendo con los resultados del análisis espacial realizado en este estudio.

Los resultados son comparables con Anthony (2023), quién obtuvo valores elevados de *Igeo* para elementos como Cd, Cu y Zn, atribuyéndolo a actividades industriales, descargas de desechos domésticos y al alto crecimiento poblacional. De acuerdo con diversos autores (Saha, Hazra, Saha y Mandal, 2015; Su, Xu, Yang y Sun, 2022), la presencia de distintos sectores industriales es una posible causa de que un número elevado de elementos muestren cierto grado de contaminación, 7 de los 9 metales presentan un *Igeo* superior a 1, lo que indica, que existe contaminación a consecuencia de diversas fuentes antropogénicas.

A través del efluente del Alto Balsas se reciben descargas de residuos de este tipo de industrias contribuyendo a los altos índices de acumulación de metales pesados en suelos (García-Nieto *et al.*, 2011). En estudios recientes sobre metales pesados en suelos agrícolas del Alto Balsas Castro-González *et al.* (2019) han demostrado elevados índices de geoacumulación en elementos como Cd y Zn, coincidiendo con los obtenidos en este estudio, siendo los únicos dos elementos que presentan grado de contaminación en todas las zonas evaluadas de ambos estudios

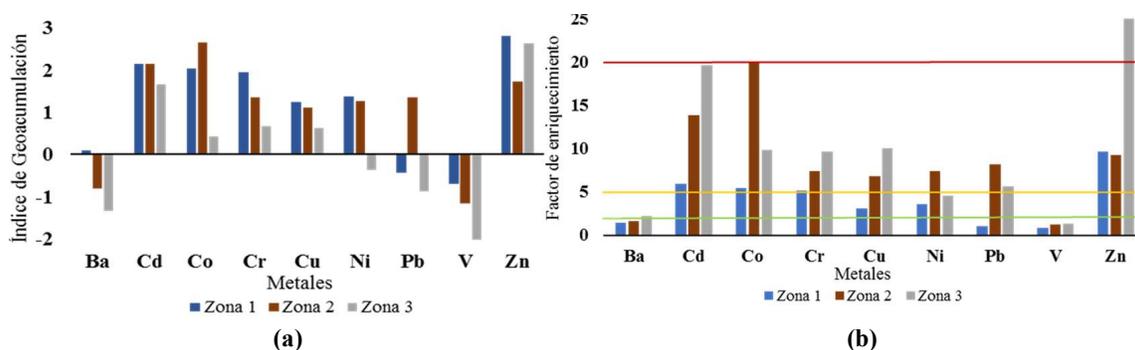


Figura 3. Gráfico de barras indicando el índice de geoacumulación (*Igeo*) y factor de enriquecimiento (FE) en suelos agrícolas irrigados con aguas del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala. (a) valores promedio del *Igeo* para metales pesados en las zonas representativas de estudio del alto balsas; (b) valores promedio del FE para metales pesados en las zonas representativas de estudio del Alto Balsas. Las líneas horizontales representan el grado de enriquecimiento, valores superiores a la línea verde indican enriquecimiento significativo (FE >2); valores superiores a la línea amarilla muestran un enriquecimiento moderado (FE >5) valores superiores a la línea roja indican un enriquecimiento muy alto (FE >20).

Figure 3. Bar chart of the geoaccumulation index (*Igeo*) and enrichment factor (EF) in agricultural soils irrigated with water from the Alto Balsas, Puebla, and Tlaxcala. (a) average values of the *Igeo* for heavy metals in each representative study area of the alto balsas; (b) average values of ef for heavy metals in each representative study area of the Alto Balsas. The horizontal lines represent the degree of enrichment, values higher than the green line indicate significant enrichment (EF >2); higher values than the yellow line show moderate enrichment (EF >5) and higher values than the red line indicates very high enrichment (EF >20).

Factor de Enriquecimiento (FE)

A través de la Figura 3b se muestran los valores obtenidos del FE, donde se identifica que todos los elementos, excepto Ba y V, presentan enriquecimiento significativo, lo que indica la presencia de contaminación antropogénica de acuerdo con la escala de Muller (1969). Las zonas II y III presentan el mayor nivel de enriquecimiento, consistente con actividad industrial y agrícola frecuente en la zona de estudio.

El FE en la zona de estudio presentó el siguiente orden: $Zn > Cd > Co > Cr > Cr > Cu > Ni > Pb > Ba > V$. Los resultados son consistentes con los obtenidos en el *Igeo*, mostrando contaminación significativa para los elementos como Cd, Co y Zn. El enriquecimiento de Cd y Zn es desconocido; sin embargo, pueden especularse que proviene de fuentes agrícola resultantes de aplicaciones intensivas de fertilizantes o agroquímicos (Liu, Bai, Gao y Li, 2023). En el estudio realizado en Jordania por Ghrefat, Abu-Rukah y Rosen (2011) obtuvieron valores elevados de FE para Cd (48.25), Co (13.66), Pb (9.25), y Zn (2.5), atribuyendo la contaminación a aguas residuales tratadas y no tratadas que son utilizadas para riego. Los resultados de este estudio muestran una relación con fuentes antrópicas de contaminación y el FE, lo que demuestra el origen de la contaminación en el Alto Balsas como factor antropogénico, resultado también obtenido en el estudio de Castro-González *et al.* (2019)

CONCLUSIONES

La concentración de metales pesados en agua y suelos agrícolas irrigados a partir de la subcuenca del Alto Balsas en Tlaxcala y Puebla están por debajo de los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. Sin embargo, las concentraciones de Cr, Co y Ni se encuentran por arriba de los límites máximos para agua de uso agrícola según la U.S. EPA. A su vez, los valores de Cr en suelo son superiores a las recomendaciones de la misma U.S. EPA.

Los valores del índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento demuestran que la contaminación de elementos como Cd, Co y Zn está relacionada con fuentes antropogénicas.

Los mapas de distribución espacial permitieron identificar las zonas de mayor contaminación en la región del Alto Balsas. Esta información podría ser de utilidad para así desarrollar acciones de prevención, control, manejo y remediación, contribuyendo a legislaciones ambientales en temas de normativas sobre concentraciones de metales pesados en manejo de cuencas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

Declaro que el estudio se realizó bajo la supervisión del Dr. José Víctor Tamariz Flores, en el Centro de Investigación de Ciencias Agrícolas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, director del Instituto. La investigación se aprobó como parte del programa de doctorado en ciencias ambientales de la BUAP.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos obtenidos en el artículo se encuentran respaldados en los registros correspondientes. De ser necesario aclarar estos, se pueden solicitar con el autor de correspondencia para llevar a cabo una revisión. Para el caso de las imágenes o gráficos de creación propia, estos se encuentran archivos de respaldo.

CONFLICTO DE INTERESES

Declaro que los resultados pueden ser publicados sin afectar los intereses de ningún particular, ni las instituciones involucradas en la emisión de esta publicación, así como los integrantes que participan en la autoría de este artículo. Se realiza esta publicación sólo con fines académicos. Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

La financiación fue recabada y facilitados por las instituciones a las que pertenecen los autores con fines académicos.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, escritura: preparación del borrador original, escritura: revisión y edición, visualización, supervisión, administración del proyecto, adquisición de fondos: J.T.R., R.C.V., G.P.O., J.V.T.F. y N.P.C.G.

AGRADECIMIENTOS

Para la elaboración de este artículo se agradece a las instituciones pertenecientes a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, al posgrado en ciencias ambientales y al Centro de Investigaciones en Ciencias Agrícolas.

LITERATURA CITADA

- Al-Zaiadi, B. H. G., & Jarallah, R. S. (2023). Water Pollution in Cobalt and Nickel by the Effect of Adding Urban Waste in Al-Diwaniyah River / Iraq. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1215(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1215/1/012034>
- Ali, S., Mir, R. A., Tyagi, A., Manzar, N., Kashyap, A. S., Mushtaq, M., ... & Bae, H. (2023). Chromium toxicity in plants: signaling, mitigation, and future perspectives. *Plants*, 12, 1502. <https://doi.org/10.3390/plants12071502>
- Anthony, T. (2023). Assessment of heavy metal contamination in wetlands soils around an industrial area using combined GIS-based pollution indices and remote sensing techniques. *Air, Soil and Water Research*, 16, 1-11. <https://doi.org/10.1177/11786221231214062>
- Ao, M., Chen, X., Deng, T., Sun, S., Tang, Y., Morel, J. L., ... & Wang, S. (2022). Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127233. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127233>
- Atiemo, M. S., Ofosu, G. F., Kuranchie-Mensah, H., Tutu, A. O., Palm, N. D., & Blankson, S. A. (2011). Contamination assessment of heavy metals in road dust from selected roads in Accra, Ghana. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 3(5), 473-480.
- Aung, H. W., Htwe, K. M., & Ko, W. (2018). Geoaccumulation and enrichment factor of some elements in soil samples. *Yadanabon University Research Journal*, 9(1), 1-8.
- Ávila-Orta, C. A., Hernández-Rodríguez, M. L., & Lozano-Morales, S. A. (2021). *Río Atoyac: hacia una gestión integral de una problemática multifactorial*. Tlaxcala, México: El Colegio de Tlaxcala. ISBN 978-607-7673-75-0
- Awagu, E. F., & Uduma, A. U. (2014). Manganese as a reference element for the interpretation of lead enrichment/depletion in selected farming soils of Nigeria. *The International Journal of Engineering and Science*, 3(2), 79-86.
- Aytop, H., Koca, Y. K., & Şenol, S. (2023). The importance of using soil series-based geochemil background values when calculating the enrichment factor in agricultural areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 6215-6230. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01640-6>
- Ayuntamiento de Huejotzingo (2019). Plan de desarrollo municipal de Huejotzingo, Puebla, 2018-2021. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <https://ojp.puebla.gob.mx/normatividad-municipal/item/1776-plan-de-desarrollo-municipal-de-huejotzingo-puebla-2018-2021>
- Barbieri, M. (2016). The importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5, 237. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>
- Castro-González, N.P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Moreno-Ortega, A., & Tamariz-Flores, J.V. (2017). Health risks in rural populations due to heavy metals found in agricultural soils irrigated with wastewater in the Alto Balsas sub-basin in Tlaxcala and Puebla, Mexico. *International Journal of The Environmental Health Research*, 27(6), 476-486. <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1386767>
- Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J. V., & Reyes-Cervantes, E. (2019). Nivel de contaminación de metales y arsénico en aguas residuales y suelos en la subcuenca del Alto Balsas en Tlaxcala y Puebla, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 335-348.
- Chabukdhara, M., Munjal, A., Nema, A. K., Gupta, S. K., & Kaushal, R. K. (2016). Heavy metal contamination in vegetables grown around peri-urban and urban-industrial clusters in Ghaziabad, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(3), 736-752. <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2015.1105723>
- Chaoua, S., Boussaa, S., El Gharmali, A., & Boumezzough, A. (2019). Impact of irrigation with wastewater on accumulation of heavy metals in soil and crops in the region of Marrakech in Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.003>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2006). Estadísticas del agua en México. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/eam_2006.pdf
- Concepción, E. D. (2022). Expansión urbana o cómo el suelo urbanizado se dispersa por el paisaje: Implicaciones para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 31(1), 2165. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2165>
- Cortés-Hernández, J. H. (2021). Origen histórico de la contaminación hídrica y análisis jurídico del río Atoyac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(1), 133-191. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-01-05>
- Davies, R., & Hall, S. J. (2010). Direct and indirect effects of urbanization on soil and plant nutrients in desert ecosystems of the Phoenix metropolitan area, Arizona (USA). *Urban Ecosystems*, 13(3), 295-317. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0120-0>
- Delgado, R. M., Rivera, O. Y., Torres, P. J., Corral, A. A. Y., Flores, M. J., & Santana, C. L.E. (2014). Determinación de cadmio, cromo, plomo y arsénico en suelos superficiales urbanos de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Cultura Científica y Tecnológica*, 11(54), 189-207.
- ESRI (2019). *ArcGis User's Guide*. Released 10.8. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.

- FEA (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental). (2006). *El agua en México: lo que todos debemos saber*. Distrito Federal, México: FEA.
- García-Carrillo, M., Luna-Ortega, J. G., Gallegos-Robles, M. Á., Preciado-Rangel, P., Cervantes-Vázquez, M. G., & González-Salas, U. (2020). Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 907-916. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.556>
- García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Briones-Corona, E., & Vázquez-Cuecuecha, O. G. (2011). Plomo y arsénico en la subcuenca del Alto Atoyac en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 7-17.
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Ghrefat, H. A., Abu-Rukah, Y., & Rosen, M. A. (2011). Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafraín Dam, Jordan. *Environmental Monitoring Assessment*, 178, 95-109. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1675-1>
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Handal-Silva, A., Pérez-Castresana, G., Morán-Perales, J., & García-Suastegui, W. (2017). Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, 3(9), 10-23.
- Haroon, B., Ping, A., Pervez, A., Faridullah, & Irshad, M. (2019). Characterization of heavy metal in soils as affected by long-term irrigation with industrial wastewater. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 9(1), 47-56. <https://doi.org/10.2166/wrd.2018.008>
- Hidalgo, R., & Zunino, H. M. (2011). La urbanización de las áreas periféricas en Santiago y Valparaíso: el papel de las relaciones de poder en el dibujo de la geografía socioresidencial. *Eure (Santiago)*, 37(111), 79-105.
- Ibañez-Álamo, J. D., & Molina-Morales, M. (2022). Ecología Urbana: Una disciplina en auge. *Ecosistemas*, 31(1), 2372. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2372>
- Ibarrarán, M. E., Mendoza, A., Pastrana, C., & Manzanilla, E. J. (2017). Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y Sociedad*, 29(69), 89-125.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Cuenca hidrológica: humedales: informe técnico*. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825189884.pdf
- Kawakami, T., Isama, K., & Ikarashi, Y. (2020). Chromium and cobalt concentrations in textile products and the amounts eluted into artificial sweat. *Journal of Environmental Chemistry*, 30, 23-28.
- Kunhikrishnan, A., Bolan, N. S., Müller, K., Laurenson, S., Naidu, R., & Kim, W. I. (2012). The influence of wastewater irrigation on the transformation and bioavailability of heavy metal (loid) s in soil. *Advances in Agronomy*, 115, 215-297.
- Liu, Z., Bai, Y., Gao, J., & Li, J. (2023). Driving factors on accumulation of cadmium, lead, copper, zinc in agricultural soil and products of the North China Plain. *Scientific Reports*, 13(1), 7429. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34688-6>
- Lokhande, R. S., Singare, P. U., & Pimple, D. S. (2011). Toxicity study of heavy metals pollutants in wastewater effluent samples collected from Talaja Industrial estate of Mumbai, India. *Resources and Environment*, 1(1), 13-19.
- López, R. J., & Montalvo, R. (2015). Expansión urbana, agua potable y saneamiento en la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT). *Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y La Economía Social*, 9(18), 1-16.
- López-Morales, C. A., Zambrano-González, L., Ruiz-Ortega, R., Guzmán, M. A., Pérez-Espejo, R., Sandoval, R., ... & Caldera, A. (2017). *El agua en México: Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica*. Ciudad de México, México: Friedrich-Ebert-Stiftung. ISBN 978-607-7833-86-4
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., & Mahlkecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of the Total Environment*, 782, 146788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Muller, G. (1969). Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 2(3), 108-188.
- Muller, G. (1986). Schadstoffe in Sedimenten - Sedimente als Schadstoffe. *Mitteilungen Der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 79, 107-126.
- ONU-HABITAT (2018). Índice básico de las ciudades prósperas, Huejotzingo, Puebla, México. Consultado el 15 de septiembre, 2025, desde <https://onu-habitat.org/index.php/indice-de-las-ciudades-prosperas-cpi-mexico-2018>
- Ouabo, R. E., Sangodoyin, A. Y., & Ogundiran, M. B. (2020). Assessment of ordinary Kriging and inverse distance weighting methods for modeling chromium and cadmium soil pollution in E-waste sites in Douala, Cameroon. *Journal of Health and Pollution*, 10(26), 200605.
- Oubane, M., Khadra, A., Ezzari, A., Kouisni, L., & Hafidi, M. (2021). Heavy metal accumulation and genotoxic effect of long-term wastewater irrigated peri-urban agricultural soils in semiarid climate. *Science of the Total Environment*, 794, 148611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148611>
- Pérez-Castresana, G., Castañeda-Roldán, E., García-Suastegui, W. A., Morán-Perales, J. L., Cruz-Montalvo, A., & Handal-Silva, A. (2019). Evaluation of health risks due to heavy metals in a rural population exposed to Atoyac River pollution in Puebla, Mexico. *Water*, 11(2), 277. <https://doi.org/10.3390/w11020277>
- Prieto-Méndez, J., González-Ramírez, C. A., Román-Gutiérrez, A. D., & Prieto-García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Quiroz-Rothe, H., & Alcántar-García, E. (2009). El urbanismo popular en México. Elementos para una historia pendiente. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44. <https://doi.org/10.20396/urbana.v9i1.8647221>
- Ramírez, R. N. L., Guevara, R. M. L., & Hernández, S. A. (2019). Principios territoriales ordenadores y desequilibrio ecológico en la periferia de Puebla: fraccionamiento Lomas de Angelópolis. *Carta Económica Regional*, 32(124), 109-134. <https://doi.org/10.32870/cer.v0i124.7771>
- Ramón-González, J. A., & Aguilar, A. G. (2021). Expansión urbana irregular, cambio de uso del suelo y deterioro ambiental en la periferia norte de la Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala: el caso del Parque Nacional La Malinche. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 441-458. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n2.89849>
- Saha, S., Hazra, G. C., Saha, B., & Mandal, B. (2015). Assessment of heavy metals contamination in different crops grown in long-term sewage-irrigated areas of Kolkata, West Bengal, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1), 4087. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4087-9>
- Sappa, G., Barbieri, M., & Andrei, F. (2020). Assessment of trace elements natural enrichment in topsoil by some Italian case studies. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1409. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03214-y>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021 SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.

- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. *Diario Oficial de la Federación*. D. F.: SEGOB.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. CDMX: SEGOB.
- Siebe, C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10(1), 15-21.
- Smith, S. R., & Giller, K. E. (1992). Effective *Rhizobium leguminosarum* biovar *trifolii* present in five soils contaminated with heavy metals from long-term applications of sewage sludge or metal mine spoil. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(8), 781-788. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90253-T](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90253-T)
- Statgraphics Technologies (2013). *Statgraphics Centurion Version 16.1 User's Manual*. The Plains, VA, USA: Statgraphics Inc.
- Su, H., Xu, D., Yang, G., & Sun, P. (2022). Assessment of heavy metals enrichment and sources in different functional areas of Sixian city. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 18(3), 271-278. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2022.271.278>
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) (2007a). *Method 3015a microwave assisted acid digestion of aqueous samples and extracts*. Washington, D.C., USA: U.S. EPA.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2007b). *Method 3051a microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils*. Washington, D.C., USA: U.S. EPA.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2012). *Guidelines for Water Reuse*. US. Agency for International Development. Washington, D.C., USA: U.S. EPA.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2018). *Method 6010d inductively coupled plasma–optical emission spectrometry*. Washington, D.C., USA: U.S. EPA.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2024). *Ecological Soil Screening Levels Documents*. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <https://www.epa.gov/chemical-research/interim-ecological-soil-screening-level-documents>
- Zhao, H., Liu, P., Qiao, B., & Wu, K. (2021). The spatial distribution and prediction of soil heavy metals based on measured samples and multi-spectral images in Tai Lake of China. *Land*, 10(11), 1227. <https://doi.org/10.3390/land10111227>