

Diversidad y distribución de metales pesados en la cuenca alta del río Atoyac

Ángel S. Hernández¹, Romeo A. Saldaña-Vázquez^{2*}, Tamara Pérez-García², Gabriela Pérez-Castresana².

1. Facultad de Ciencias Biológicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Edificio 112-A, Ciudad Universitaria, 72570, Puebla, México
2. Instituto de Investigaciones en Medio Ambiente Xavier Gorostiaga, S.J. Universidad Iberoamericana Puebla, Blvd. del Niño Poblano No. 2901, Col. Reserva Territorial Atlíxcáyotl, San Andrés Cholula, Puebla, México C. P. 72820.

*corresponding author: romeoalberto.saldana@iberopuebla.mx; ORCID: 0000-0002-6442-772X

Resumen

Uno de los desafíos ambientales más importantes en el mundo es reducir la contaminación de los cuerpos de agua dulce continentales. Para mitigar la contaminación en los cuerpos de agua es necesario conocer la distribución geográfica de los agentes contaminantes, así como su concentración. Se ha planteado la hipótesis de que la distribución de los elementos contaminantes se rige por la ubicación de las fuentes de contaminación y las unidades geográficas. Para probar esta hipótesis, realizamos una revisión sistemática de la riqueza, composición y distribución de metales pesados observados en aguas y sedimentos de la cuenca alta del río Atoyac en Puebla, México. Se recolectaron más de 500 observaciones de 39 metales pesados de la cuenca del río Atoyac, tanto en agua como en sedimentos. La mayor riqueza de metales pesados se registró al final del flujo de los ríos de la cuenca, especialmente en los sedimentos. Encontramos que 15 metales pesados superan los umbrales establecidos en al menos una de las normas ambientales y de salud de México, Canadá y Estados Unidos. Concluimos que la riqueza y composición de metales pesados en los ríos de una cuenca están asociados con sus fuentes de contaminación y el flujo del río a través de la cuenca. Los resultados de esta investigación podrían ser utilizados para realizar acciones para proteger los cuerpos de agua en la cuenca del río Atoyac y reducir la contaminación por metales pesados.

Palabras clave: Mitigación de la contaminación, Industrias, Restauración ecológica, Síntesis de literatura, Umbrales de contaminación.

Introducción

La disponibilidad de agua para uso humano es una de las problemáticas de mayor urgencia en la actualidad (Vollmer and Harrison, 2021). Aproximadamente el 80% de la población mundial vive en áreas donde la disponibilidad del agua y los ecosistemas acuáticos están altamente amenazados (Vörösmarty et al., 2010). Esto pone en riesgo tanto la salud e integridad humana, como la biodiversidad en cuerpos de agua dulce, la cual se está reduciendo el doble de rápido que sus contrapartes marinas y terrestres (Vollmer and Harrison, 2021). Esta urgencia no se ve reflejada en los esfuerzos para combatir la contaminación de los cuerpos de agua dulce, lo cual reduce aún más la disponibilidad de agua para uso humano (Vörösmarty et al., 2010). Las actividades humanas como la agricultura, industria metalúrgica, química, y textil son las principales fuentes de contaminación en los cuerpos de agua dulce en diferentes partes del mundo (Mora et al., 2021; Senesi et al., 1999; Vareda et al., 2019). Los contaminantes principales son los fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, metales pesados y compuestos orgánicos de origen industrial, materia orgánica, y sedimentos (Rodríguez-Espinosa et al., 2018a; Tabla, 2019; Vörösmarty et al., 2010). Los metales pesados son contaminantes potencialmente peligrosos ya que tienden a bioacumularse y biomagnificarse en los niveles tróficos superiores, pudiendo fácilmente migrar del agua al humano y al resto del ecosistema a través del aire o suelo, llegando a acumularse en los tejidos de las plantas silvestres y en ocasiones alimentos (Aladesanmi et al., 2019; Ali et al., 2019). Esto puede causar varios tipos de cáncer, cirrosis, daño pulmonar y renal, retraso en desarrollo físico y mental de niños, disminución de la fertilidad, daño a sistema nervioso periférico y central, entre otros efectos (Baby et al., 2010; Kulkarni et al., 2014; Rehman et al., 2018; Sankhla et al., 2016).

Las consecuencias a la salud humana y ecosistémica que trae la presencia de los metales pesados en los ríos son potencialmente graves. Por lo tanto, es importante cuantificarlos, y realizar acciones para que no se rebasen las concentraciones adecuadas para la salud de las personas y ecosistemas. Sintetizar la información que existe sobre la contaminación del agua

superficial por metales pesados geográficamente, es un primer paso para entender la magnitud de la contaminación y sus fuentes, en diferentes secciones de una cuenca (Ma et al., 2022; Liu et al., 2022b, 2022a). El estudio de la distribución geográfica de metales pesados puede revelar el riesgo ecológico, sanitario, y económico en una cuenca (Liu et al., 2022a; Pizarro et al., 2010; Rodríguez-Espinosa et al., 2018b; Su et al., 2022). Esta información es crucial para la determinación de estrategias racionales para el manejo de las fuentes de contaminación, y la priorización de las zonas de remediación (Liu et al., 2022a; Pizarro et al., 2010; Vörösmarty et al., 2010).

En México existen cuencas con alto grado de contaminación de agua superficial, donde se puede investigar si la distribución de la contaminación es heterogénea y detectar lugares de especial atención para la mitigación o remediación de esta. El sistema hidrológico de la cuenca alta del río Atoyac, ubicada en los estados de Puebla y Tlaxcala, es un ejemplo de lo anterior. Esta se conforma por los ríos Zahuapan, Atoyac y Alseseca (Fig. 1).

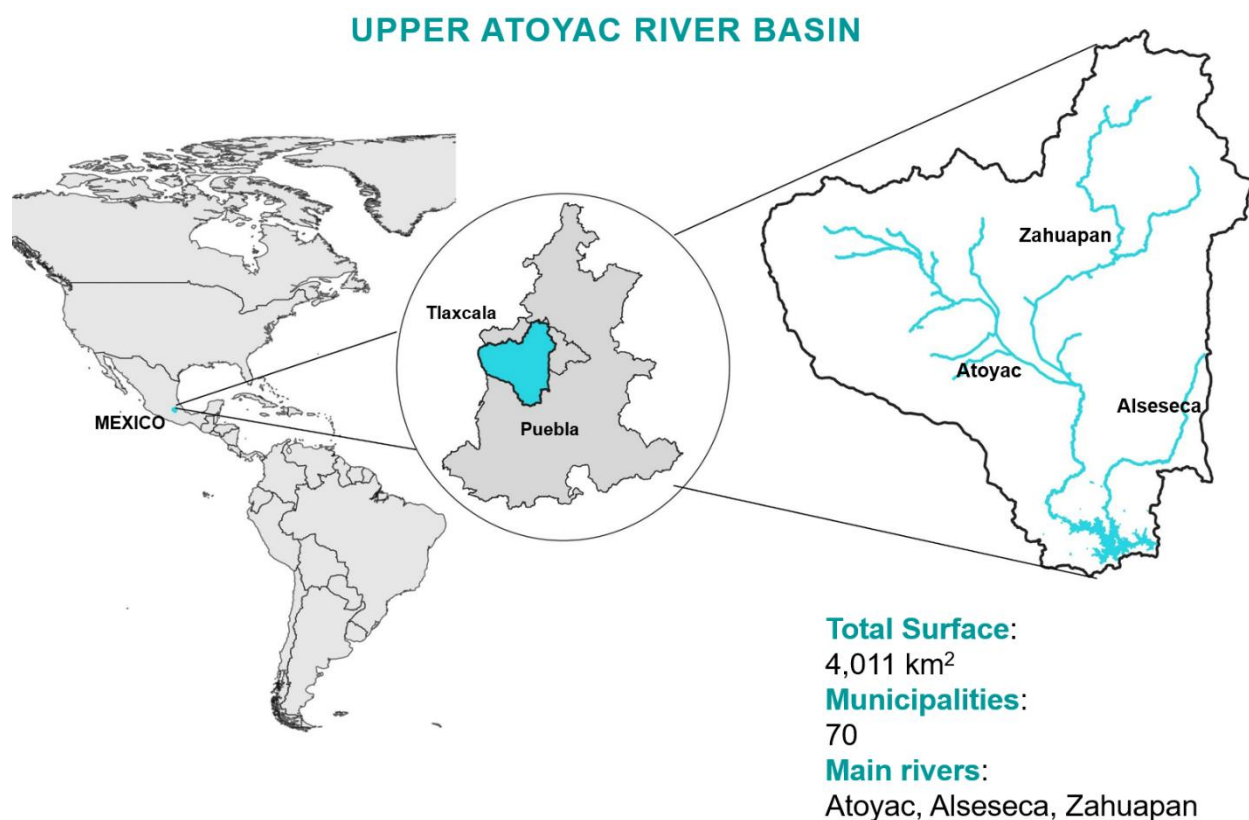


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta del río Atoyac, México.

Tanto el río Atoyac como el Zahuapan reciben descargas de aguas residuales urbanas, retornos de aguas de campos agrícolas con uso excesivo de agroquímicos, descargas de la industria textil, química, petroquímica, metalmecánica, automotriz, y alimentos (Mora et al., 2021). Lo anterior aumenta las concentraciones de metales pesados y otros contaminantes en agua y sedimentos de la cuenca (Castro-González et al., 2018; García-Nieto et al., 2011a; Rodríguez-Espinosa et al., 2018a). Las personas que habitan la cuenca alta del río Atoyac se ven directamente afectadas por su contaminación (Soto-MontesdeOca and Ramirez-Fuentes, 2019). Muchas de estas se encuentran en una situación de escases de agua debido a la sobreexplotación del acuífero y falta de infraestructura hidráulica (Pérez-Castresana et al., 2020; Salcedo-Sánchez et al., 2020). A pesar de ello, el agua superficial contaminada es utilizada para

actividades agrícolas y uso recreativo (Castresana et al., 2019; Castro-González et al., 2019; Rodríguez-Espinosa et al., 2018a; Soto-MontesdeOca and Ramirez-Fuentes, 2019). Por lo tanto, es importante conocer el grado de contaminación de los ríos de la cuenca y conocer que contaminantes exceden o han excedido históricamente las concentraciones permitidas por las normativas mexicanas e internacionales.

La riqueza y composición de metales pesados que hay en una sección de los ríos se encuentra determinada por las fuentes de transferencia aledañas a los ríos y por el transporte de contaminantes a través de los afluentes (Ma et al., 2022; Liu et al., 2022a). Esto podría estar ocurriendo en la cuenca alta del río Atoyac. Con el objetivo de conocer si los metales pesados reportados en los ríos de la cuenca alta del río Atoyac sintetizamos la información disponible sobre su diversidad (riqueza y composición) y distribución en la cuenca. Así mismo, para conocer el riesgo a la salud de las personas y los ecosistemas, investigamos: 1) las concentraciones de metales pesados reportada en los estudios y 2) comparamos dichas concentraciones con las permitidas por los criterios ecológicos mexicanos y norteamericanos de calidad del agua. Todo lo anterior, con la intención de sintetizar la información sobre la contaminación por metales pesados en la cuenca y que esta pueda servir de referencia para realizar acciones de mitigación y rehabilitación de los ecosistemas de la cuenca.

Métodos

Búsqueda de literatura

Se realizaron diferentes búsquedas utilizando Google Scholar (GS), Microsoft Academic (MA), Dimensions (DM), Directory of open access journals (DOAJ) y Bielefeld Academic Search Engine (BASE). Utilizamos estos cinco motores de búsqueda y bases de datos académicos debido a la disponibilidad de motores de búsqueda en nuestras instituciones; y porque pueden mostrar no solo los documentos científicos publicados en revistas internacionales, sino que pueden detectar literatura gris con datos relevantes (Haddaway et al., 2015). El protocolo de búsqueda se muestra

en la Tabla 1; todas las búsquedas se realizaron en septiembre de 2021. No se impuso ninguna restricción en función del año de publicación o el tipo de documento.

Tabla 1. Palabras clave y resultados de la literatura de los metales pesados en la cuenca del río Atoyac. La frase entre paréntesis indica la sección del documento donde se buscaron las palabras clave. Los motores de búsqueda utilizados fueron Google Scholar (GS), Microsoft Academic (MA), Dimensions (DM), Directory of open access journals (DOAJ) y Bielefeld Academic Search Engine (BASE).

Búsqueda	Palabra clave	Motor	No. de documentos
1	Atoyac river heavy metals (all article)	GS	340
2	Atoyac river basin toxicology (all article)	GS	271
3	Atoyac river pollution (title)	GS	9
4	Atoyac river (title) heavy metals (abstract)	MA	18
5	Atoyac river (title) pollution (abstract)	MA	18
6	Atoyac river (title) toxicology (abstract)	MA	0
7	Atoyac river heavy metals (title and abstract)	DM	7
8	Atoyac river pollution (title and abstract)	DM	14
9	Atoyac toxicology (title and abstract)	DM	0
10	Atoyac river heavy metals (abstract)	DOAJ	3
11	Atoyac river pollution (abstract)	DOAJ	4

12	Atoyac river toxicology (abstract)	DOAJ	0
13	Atoyac (title) river heavy metals (all the article)	BASE	6
14	Atoyac (title) river pollution (all the article)	BASE	16
15	Atoyac (title) toxicology (all the article)	BASE	4

124

125 *Criterio de selección de estudios*

126 Una vez obtenidos los documentos, se revisaron los títulos y resúmenes para asegurar que
 127 cumplieran con los requisitos para poder extraer la información adecuada. Los criterios de
 128 inclusión para seleccionar estos documentos fueron los siguientes: 1) los estudios debían
 129 haberse realizado en la cuenca alta del río Atoyac en los estados de Puebla o Tlaxcala; 2) los
 130 estudios deben tener datos para al menos un parámetro de medición de metales pesados,
 131 incluidos metaloides, arsénico y selenio; 3) las concentraciones deben ser reportadas en el
 132 documento principal o en el material complementario; 4) las medidas deben tomarse en el agua
 133 del río o en los sedimentos.

134

135 *Extracción de datos y análisis*

136 Con los estudios seleccionados se construyó una base de datos con 584 observaciones de
 137 metales pesados. Las unidades de los elementos se estandarizaron a mg/L. Se buscaron los
 138 parámetros umbral reportados para cada elemento de acuerdo con una norma mexicana y dos
 139 norteamericanas de medio ambiente acuático y se compararon con los valores medios
 140 históricamente reportados en la cuenca alta del río Atoyac. La norma mexicana fue la "DOF-
 141 13/12/1989-CE-CCA-001/89", esta norma establece los límites máximos permisibles (LMP) de

contaminantes presentes en los cuerpos de agua mexicanos. Debido a que no todos los elementos contaminantes están considerados en las normas mexicanas, se agregaron los límites de la “Agencia de Contaminación Ambiental de los Estados Unidos: Criterios Nacionales de Calidad del Agua Recomendados” y las “Pautas de Calidad Ambiental de Canadá (CEQG)”.

La distribución y similitud de los elementos contaminantes está relacionada con las unidades geográficas de las regiones de una cuenca (Ma et al., 2022; Rodríguez-Espinosa et al., 2018a). Por lo tanto, realizamos un análisis de agrupamiento jerárquico y un mapa de calor utilizando cada subcuenca como factor de agrupación para evaluar si la distribución de metales pesados era diferente entre las subcuencas de la cuenca alta del río Atoyac. Separamos los datos según el lugar del río donde se han detectado los metales pesados (agua y sedimentos).

Siguiendo a Rodríguez-Espinosa et al. (2018) clasificamos cinco regiones de la cuenca alta del río Atoyac. Estas fueron: 1) río Zahuapan (ZR), 2) río alto Atoyac (ATR), 3) Zona de confluencia (CZ), 4) Presa Manuel Ávila Camacho (VD) y 5) río Alseseca (ALR). La CZ comienza en el empalme Atoyac-Zahuapan y termina en el río Atoyac (Fig. 3). La CZ es parte de la subcuenca ATR, sin embargo, fue clasificada como una región separada por ser el punto de unión de los ríos Atoyac y Zahuapan, y una zona de alta actividad industrial (Fig. 3). Construimos tres matrices, una contenía el número de observaciones realizadas para cada metal pesado registrado en el agua del río, otra para sedimentos y una para ambos. En cada renglón se colocaron la identidad de los metales pesados, y en las columnas las cinco regiones geográficas de estudio. En cada celda se colocó la proporción del elemento reportada en el agua y sedimentos por cada región de la cuenca. Esto se hizo para reducir el efecto de las diferencias en los esfuerzos de muestreo de los estudios revisados en la región de la cuenca. Estas matrices se utilizaron para crear dos mapas de calor, utilizando la función “pheatmap” del paquete “pheatmap” versión 1.0.12 del software en lenguaje R (Kolde y Kolde, 2015).

Resultados

Revisión sistemática

Se encontraron 710 estudios, de los cuales 524 fueron descartados por ser estudios cualitativos, no relacionados con el tema de interés o duplicados. De los 186 estudios restantes, 141 eran de una región diferente a Puebla-Tlaxcala y 30 estudios no tenían datos relevantes para los parámetros de interés (Fig. 1). Los 15 estudios restantes se incorporaron en nuestra revisión; estos documentos se publicaron desde 2000 hasta 2020 (Tabla 2).

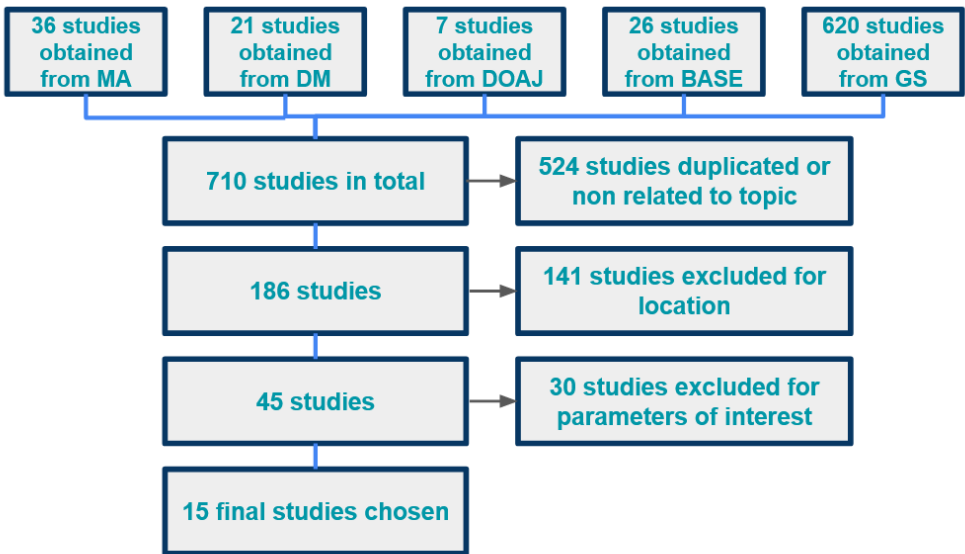


Figura 1. Diagrama de flujo que muestra los resultados del proceso de búsqueda de literatura y selección de estudios según la convención PRISMA (Urrútia y Bonfill, 2010) para la revisión sistemática de literatura y metanálisis. Los documentos excluidos no cumplen los criterios de selección. Los estudios se obtuvieron de Google Scholar (GS); Microsoft Académico (MA); Dimensiones (DM); Directorio de revistas de acceso abierto (DOAJ); y Bielefeld Academic Search Engine (BASE).

Tabla 2. Autores, tipo de publicación (TP), año de muestreo (SY), ubicación según región de la cuenca y número de mediciones de metales pesados por estudio (n) en la literatura seleccionada. En la cuenca alta del río Atoyac se reconocen cinco regiones: 1) río Zahuapan (ZR), 2) río Alto Atoyac (ATR), 3) Zona de Confluencia (CZ), 4) Presa Manuel Ávila Camacho (VD) y 5) río Alseseca (ALR). El número de ID está asociado con la literatura revisada (ver Material Suplementario 1).

ID	Authors	TP	SY	Basin region	n
01	Pérez Castresana et al., (2018)	Journal article	2016	CZ	16
05	García-Nieto et al., (2011)	Journal article	2008	ZR, ATR	8
07	Rodríguez-Espinosa et al., (2018)	Journal article	2013	ZR, ATR, CZ, VD, ALR	84
08	Aburto-Medina et al., (2017)	Journal article	2013	CZ	11
10	Morales-García et al., (2017)	Journal article	2009	CZ, VD, ALR	51
12	Méndez-García et al., (2000)	Journal article	1996-97	ATR	5
22	Hernandez-Ramirez et al., (2019)	Journal article	2016	ATR, CZ	23
24	Morales-García et al., (2014)	Journal article	2009	VD	11
35	Tabla-Hernández et al., (2019)	PhD thesis	2016-17	VD	186
39	Castro-González et al., (2019)	Journal article	2014-15	ZR, ATR	16
46	Tabla-Hernandez et al., (2019)	Journal article	2017	CZ, VD, ALR	65
54	Shruti et al., (2017)	Journal article	No data	ATR, ZR, CZ	75
66	Tabla-Hernández et al., (2018)	Journal article	No data	CZ, VD, ALR	13
85	Bonilla et al., (2014)	Journal article	2012	CZ	12
183	Luna, (2020)	PhD thesis	2018	ATR	8

191 *La diferencia en los esfuerzos de muestreo en las regiones de la cuenca del río Atoyac*

192 Encontramos 39 metales pesados en los estudios revisados (ver Material Suplementario 1), y
193 una diferencia significativa en los esfuerzos de muestreo de los estudios seleccionados. La VD
194 fue la región con más mediciones de metales pesados (Fig. 2 y 3), tanto en agua como en
195 sedimentos de los ríos. Además, hay más mediciones en sedimentos de ríos que en agua para
196 las cinco regiones. Las industrias reportadas por las autoridades ambientales de México en su
197 “Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)” se concentran en el río
198 Zahuapan (ZR), río Alto Atoyac (ATR) y zona de Confluencia (CZ; Fig. 3).

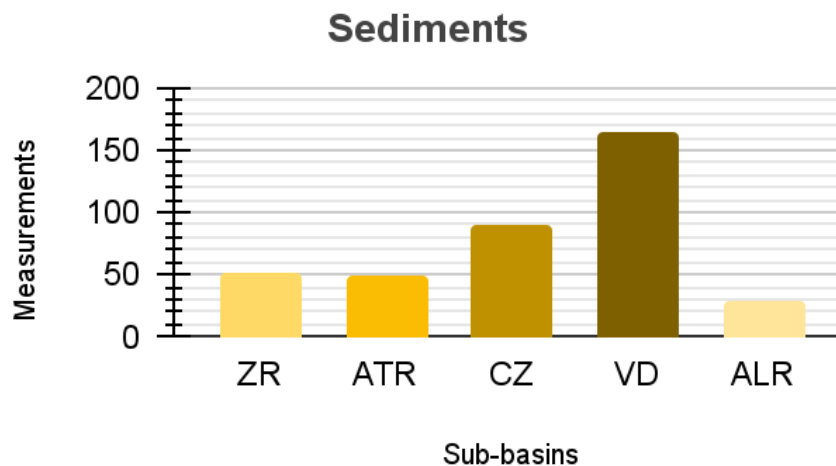
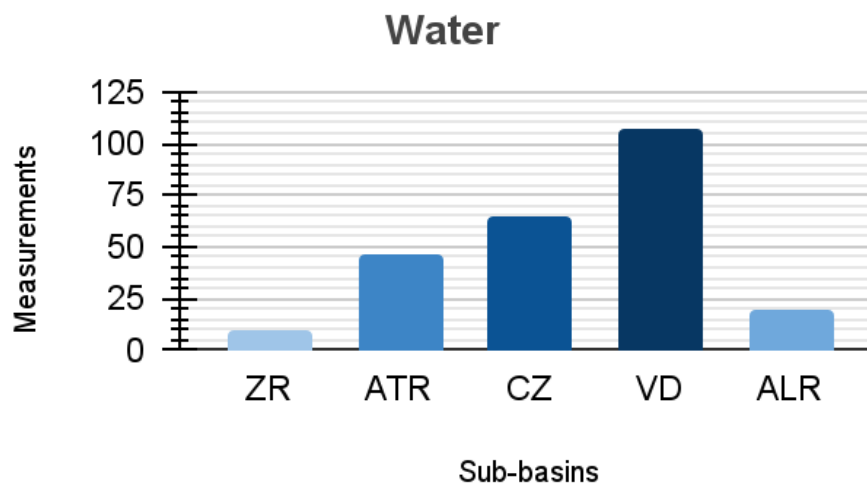


Figura 2. El número de mediciones de metales pesados en agua de río y sedimentos para cada una de las regiones de la cuenca, 1) río Zahuapan (ZR), 2) río Alto Atoyac (ATR), 3) Zona de confluencia (ZC), 4) Presa Manuel Ávila Camacho (VD) y 5) río Alseseca (ALR).

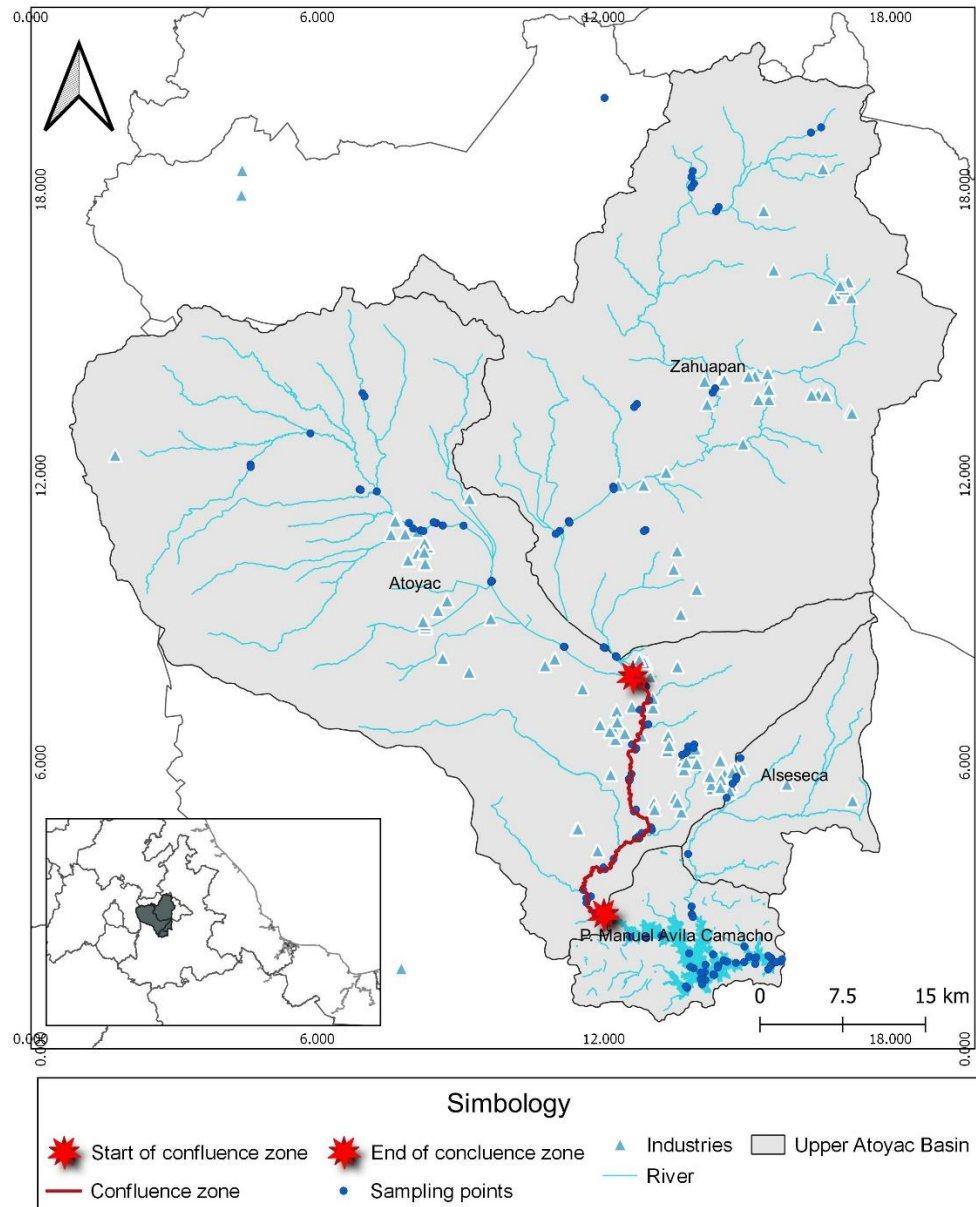


Figura 3. Distribución de las mediciones de estudios (puntos de muestreo) e industrias que descargan metales pesados en la cuenca alta del río Atoyac según el “Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)”.

Metales pesados por región

La distribución y composición de los metales pesados fue diferente entre cada región de la cuenca del río Atoyac (Fig. 4). La diversidad de cada región cambió dependiendo de la superficie de muestreo: en agua, ZR tenía 8 metales pesados, ALR tenía 14, ATR tenía 24, CZ tenía 23 y VD tenía 29 (Fig. 4a). En los sedimentos ALR tenía 17 metales pesados, VD tenía 35, CZ tenía 29, ZR tenía 26 y ATR tenía 26. Se reportaron más metales pesados en los sedimentos (Fig. 4b) del río Atoyac, en comparación con el agua (Fig. 4a). A pesar de esto, los elementos más registrados en el agua son altamente ecotóxicos, como el arsénico (As) y el plomo (Pb).

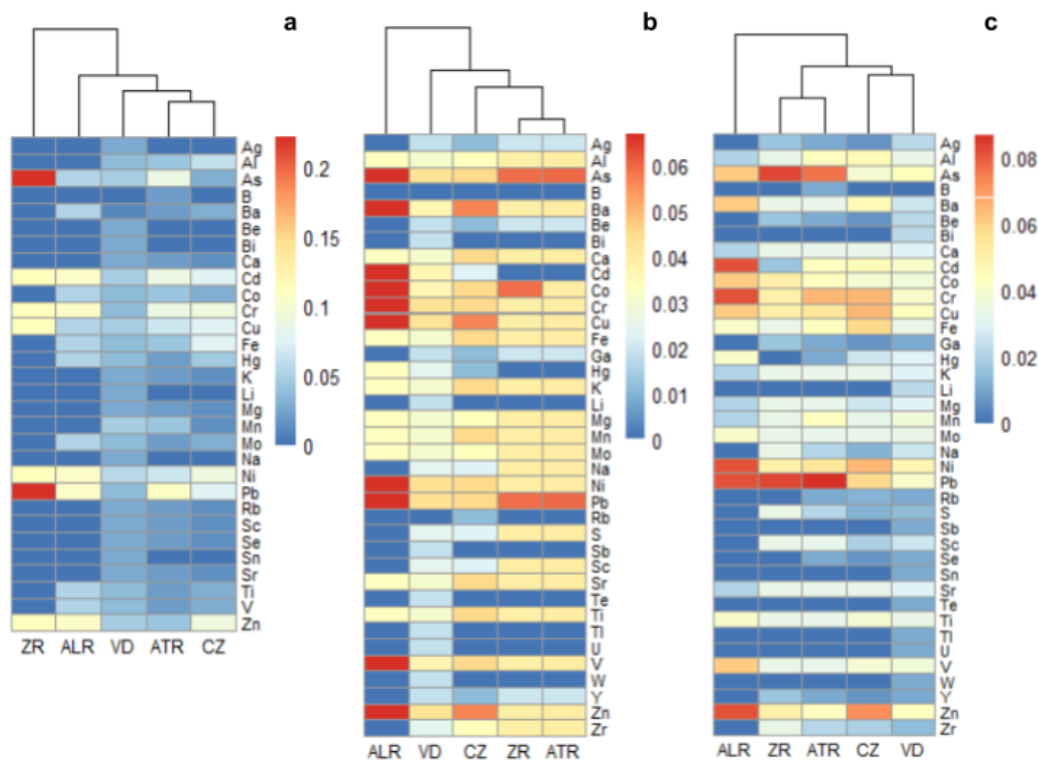


Figura 4. Mapas de calor de los metales pesados reportados en las regiones de la cuenca del río Atoyac de los estudios revisados (a-c). Cada dendrograma clasifica las regiones por similitud de composición de metales pesados. Los valores están en porcentaje del total de observaciones de cada elemento registrado por estudios científicos en los gráficos a-c. Los mapas de calor contienen (a) los metales pesados reportados en el agua del río, (b) en los sedimentos y (c) tanto en el agua del río como en los sedimentos.

Metales pesados que rebasan las normas de calidad del agua

Encontramos 15 metales pesados que excedieron uno o más de los umbrales establecidos por la norma mexicana (DOF-13/12/1989-CE-CCA-001/89) e internacionales (EE. UU. y Canadá; Tabla 3). De estos elementos, el arsénico (As) y el cadmio (Cd) se destacan por exceder todas las normas utilizadas, siendo emitidos por industrias en todas las regiones (Figura 4). La plata (Ag), el aluminio (Al), el boro (B), el bario (Ba), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el manganeso (Mn), el selenio (Se) y el zinc (Zn) superaron al menos una de las normas, siendo algunos de ellos altamente ecotóxicos como el selenio (Se).

Tabla 3. Valor medio de metales pesados encontrados en el agua de la cuenca del río Atoyac que superan al menos uno de los umbrales de agua dulce para Protección de la vida acuática (Aq. life), Riego agrícola (Agric.), Uso público urbano (Pub. urban), Recreativo uso con contacto primario (Recre.), y Consumo humano (Hum. con.). Umbrales de referencia provenientes de las siguientes normas: Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQG); Criterios Nacionales de Calidad del Agua Recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA); Criterios Ecológicos de Calidad del Agua Publicados en el Diario Oficial de la Federación DOF.CE-CCA-001/89 (CECCA). Todas las unidades se reportan en mg/L. Todos los valores normales excedidos por las concentraciones medias de los elementos están escritos en negrita. NA se utiliza cuando la norma no tiene valor para este parámetro.

Element	Mean ($\pm$ SE)	Aq. life (CEQG)	Aq. life (USEPA)	Aq. life (CECCA)	Agric. (CECCA)	Recre. (CECCA)	Hum. con. (USEPA)
Ag	0.00046 $\pm$ 0.00016	0.00025	NA	NA	NA	NA	NA
Al	1.78 $\pm$ 0.93	NA	NA	0.05	5.00	NA	NA
As	1.45 $\pm$ 1.38	0.005	0.15	0.20	0.10	NA	0.00014
B	1.53	1.50	NA	NA	0.70	NA	NA
Ba	0.07 $\pm$ 0.0079	NA	NA	0.01	NA	NA	NA
Cd	1.29 $\pm$ 0.79	NA	0.00072	NA	0.01	NA	NA
Cr	0.36 $\pm$ 0.2	0.0089	0.074	0.01	1.00	NA	NA
Cu	1.06 $\pm$ 0.86	NA	NA	NA	0.20	NA	NA
Fe	2.9 $\pm$ 0.94	0.30	1.00	1.00	5.00	NA	NA
Hg	0.00099 $\pm$ 0.00038	0.000026	0.077	0.00001	NA	NA	NA
Mn	0.28 $\pm$ 0.068	NA	NA	NA	NA	NA	0.10
Ni	1.51 $\pm$ 0.96	NA	0.05	NA	0.20	NA	4.60
Pb	0.38 $\pm$ 0.199	NA	0.0025	NA	5.00	NA	NA
Se	0.0015 $\pm$ 0.00092	0.001	NA	0.008	0.02	NA	4.20
Zn	0.19 $\pm$ 0.103	NA	0.12	NA	2.00	NA	26.00

246

247 **Tabla 4.** Metales pesados que superan los valores umbral en los sedimentos de la cuenca del
248 río Atoyac. Los valores umbral provienen de la Protección de la vida acuática de las Pautas de
249 calidad ambiental canadienses (CEQG); y el nivel de efecto más bajo de “Un manual de
250 orientación para respaldar la evaluación de sedimentos contaminados en ecosistemas de agua
251 dulce” de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA). Todas las unidades se
252 informan en ug/kg. NA se utiliza cuando la norma no tiene valor para este parámetro. Los valores
253 umbral de las normas se presentan en las columnas CEQG y USEPA.

Element	Mean ($\pm$ SE)	CEQG	USEPA
---------	------------------	------	-------

Cd	2705.55 ± SE 1175.78	600.00	600.00
Cr	111360 ± SE 20495.68	37300.00	26000.00
Cu	31055.29 ± SE 4197.38	35700.00	16000.00
Hg	1040 ± SE 40	170.00	200.00
Ni	41252.5 ± SE 4834.92	NA	16000.00

254

255

256 **Discusión**

257 A pesar de que la contaminación de los ríos de la cuenca del río Atoyac afecta gravemente a la
 258 salud de las personas que la habitan, no había un estudio que describiera la distribución de los
 259 metales pesados presentes en la cuenca. La hipótesis de trabajo fue que la diversidad y
 260 distribución de los metales pesados registrados en los ríos de la cuenca alta del río Atoyac se
 261 relaciona con la ubicación geográfica de cada subcuenca. Encontramos que la mayor diversidad
 262 de metales pesados se encuentran en la región de la presa Manuel Ávila Camacho (VD) y la
 263 zona de confluencia (CZ). Esto puede deberse a que VD es el cuerpo de agua receptor de los
 264 ríos Atoyac y Alseseca. Mientras que CZ recibe los afluentes de la subcuenca del río Atoyac
 265 (ATR) y del Zahuapan (ZR), además de ser una zona con alta densidad industrial que vierte
 266 aguas residuales al sistema de alcantarillado. A continuación, discutiremos las implicaciones de
 267 estos resultados, así como las concentraciones promedio históricas para las cinco unidades de
 268 estudio en comparación con las normas nacionales y extranjeras.

269 La revisión sistemática de la literatura arrojó 15 estudios con datos relevantes para incluir
 270 en el análisis. Los estudios encontrados fueron publicados del 2000 al 2021, siendo el 73% (11
 271 estudios) de ellos del 2015 en adelante. Un aspecto interesante de nuestra revisión es que no
 272 encontramos datos de la composición de metales pesados de la época preindustrial de la cuenca,

la cual se ubica antes de 1970. Esto imposibilita la aplicación del índice de geoacumulación, factor de enriquecimiento, índice de carga de contaminantes, e índice de potencial riesgo ecológico. Dificultando el discernimiento del enriquecimiento de metales pesados de origen antrópico en la cuenca.

Entre las regiones con mayor proporción de observaciones de metales pesados destaca la subcuenca del río Alseseca (ALR). El que esta subcuenca tenga una mayor proporción de observaciones de metales pesados, sugiere que es una subcuenca con mayor frecuencia de descarga de estos en la cuenca. En esta cuenca se ha reportado una mayor proporción de metales como el Cr, Cu, V, y Zn. Finalmente, el tipo de actividad que realizan las industrias de esa región (RETC).

La diversidad de metales pesados registradas es mayor en los sedimentos que en el agua de los ríos de la cuenca. Esto puede deberse a que solamente alrededor del 1% de los metales pesados permanece suspendido en el agua (Rodríguez-Espinosa et al., 2018a). A pesar de esto, pueden reingresar a la columna de agua por perturbación hidrodinámica, reacciones químicas, y procesos biológicos (Rodríguez-Espinosa et al., 2018a). Esto, aunado a la alta movilidad del agua en los ríos, convierte a los sedimentos en la herramienta más confiable para el diagnóstico de contaminación por metales pesados en estos cuerpos de agua.

La composición de metales pesados en sedimentos en la región es influida considerablemente por la ubicación geográfica de las subcuencas. Esto es validado por la diversidad de metales pesados observados en la presa Manuel Ávila Camacho (VD), la cual es mayor en comparación con las demás y la composición de metales pesados es similar al resto de subcuencas. La subcuenca de la presa de Manuel Ávila Camacho (VD) presenta la mayor diversidad de contaminantes tanto en agua como en sedimentos, seguida por la zona de confluencia (CZ). En el registro de emisiones y transferencia de contaminantes (RETC) no se registran descargas directas a VD, lo que sugiere que la mayoría de los metales pesados encontrados en VD escaparon de los sedimentos de CZ y río Alseseca (ALR), reingresando a la

columna de agua por perturbación hidrodinámica, reacciones químicas y/o procesos biológicos. Los esfuerzos de reducción, mitigación y biomonitoreo de la contaminación deben ser enfocados en estas dos regiones (CZ y ALR), pues constituyen dos “embudos” naturales para los contaminantes, antes de que estos sean dispersados en toda la extensión de la región de la presa de Manuel Ávila Camacho (VD).

En la cuenca del río Atoyac, las concentraciones promedio históricas de 15 metales pesados en agua, y 5 metales pesados en sedimentos, rebasan los umbrales establecidos por normas de calidad del agua mexicanas y norteamericanas. Los metales pesados que rebasan las concentraciones umbral de las normas mencionadas son Ag, Al, As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se y Zn en agua; y Cd, Cr, Cu, Hg y Ni en sedimento. Las poblaciones están expuesta a estos metales a través de diferentes vías como ingestión, inhalación y contacto dérmico (Mora et al., 2021). La exposición de la población a estos metales se da por la cercanía de las viviendas con los ríos, y el uso de aguas contaminadas para riego de cultivos agrícolas. La presencia de estas concentraciones de metales pesados en la cuenca es una seria amenaza para la salud humana y ecosistémica, pueden ser tóxicos en concentraciones elevadas y provocar inhibición metabólica, pudiendo causar a las poblaciones humanas varios tipos de cáncer, cirrosis, daño renal, retraso en desarrollo físico y mental de niños, disminución de la fertilidad, daño a sistema nervioso periférico y central, entre otros efectos (Baby et al., 2010; Kulkarni et al., 2014; Rehman et al., 2018; Sankhla et al., 2016). Las concentraciones promedio de metales pesados en los sedimentos de la cuenca alta del río Atoyac son cuatro veces más a las recomendadas por las normas canadienses y norteamericanas.

En conclusión, la riqueza y composición de metales pesados en la cuenca alta del río Atoyac está asociada a las subcuencas, y aparentemente al flujo de agua dentro de ésta. Esta información puede ser usada para realizar acciones de control de descarga de aguas residuales en la cuenca, así como acciones de mitigación de la prevalencia de estos en los cuerpos de agua.

326

327 References

- 328 Aburto-Medina, A., Ortiz, I., Hernández, E., 2017. Prevalence of Enterobacteriaceae and
329 contaminants survey in sediments of the Atoyac River. *Ciencias del Agua* 3, 27–37.
- 330 Aladesanmi, O.T., Oroboade, J.G., Osisiogu, C.P., Osewole, A.O., 2019. Bioaccumulation factor
331 of selected heavy metals in *Zea mays*. *J Health Pollut* 9.
- 332 Ali, H., Khan, E., Ilahi, I., 2019. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous
333 Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *J Chem* 2019,
334 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- 335 Baby, J., Raj, J.S., Biby, E.T., Sankarganesh, P., Jeevitha, M. V, Ajisha, S.U., Rajan, S.S.,
336 2010. Toxic effect of heavy metals on aquatic environment. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*
- 337 Bonilla, M., Silva, S., Toxtle, J., Santamaría, J., 2014.
338 Concentraciones de metales pesados totales en aguas residuales vertidas a
339 ecosistemas acuáticos por dos parques industriales en Puebla, México. *Revista*
340 *Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*.
- 341 Castresana, G.P., Roldán, E.C., Suastegui, W.A.G., Perales, J.L.M., Montalvo, A.C., Silva, A.H.,
342 2019. Evaluation of health risks due to heavy metals in a rural population exposed to
343 Atoyac River pollution in Puebla, Mexico. *Water (Switzerland)* 11.
344 <https://doi.org/10.3390/w11020277>
- 345 Castro-González, N.P., Calderón-Sánchez, F., Castro de Jesús, J., Moreno-Rojas, R., Tamariz-
346 Flores, J. V., Pérez-Sato, M., Soní-Guillermo, E., 2018. Heavy metals in cow's milk and
347 cheese produced in areas irrigated with waste water in Puebla, Mexico. *Food Addit*
348 *Contam Part B Surveill* 11, 33–36. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1397060>
- 349 Castro-González, N.P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J.V., Reyes-
350 Cervantes, E., 2019. Heavy metals pollution level in wastewater and soils in the alto balsas
351 sub-basin in tlaxcala and puebla, Mexico. *Revista Internacional de Contaminacion*
352 *Ambiental* 35, 335–348. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.06>
- 353 García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García- Gallegos, E., Hernández-
354 Acosta, E., Briones-Corona, E., Vázquez-Cuecuecha, O.G., 2011a. PLOMO Y ARSÉNICO
355 EN LA SUBCUENCA DEL ALTO ATOYAC EN TLAXCALA, MÉXICO. *Revista Chapingo*
356 *Serie Ciencias Forestales y del Ambiente XVII*, 7–17.
357 <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.040>
- 358 García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García- Gallegos, E., Hernández-
359 Acosta, E., Briones-Corona, E., Vázquez-Cuecuecha, O.G., 2011b. PLOMO Y ARSÉNICO
360 EN LA SUBCUENCA DEL ALTO ATOYAC EN TLAXCALA, MÉXICO. *Revista Chapingo*
361 *Serie Ciencias Forestales y del Ambiente XVII*, 7–17.
362 <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.040>
- 363 Haddaway, N.R., Collins, A.M., Coughlin, D., Kirk, S., 2015. The Role of Google Scholar in
364 Evidence Reviews and Its Applicability to Grey Literature Searching. *PlosOne* 10,
365 e0138237.
- 366 Hernandez-Ramirez, A.G., Martinez-Tavera, E., Rodriguez-Espinosa, P.F., Mendoza-Pérez,
367 J.A., Tabla-Hernandez, J., Escobedo-Urías, D.C., Jonathan, M.P., Sujitha, S.B., 2019.
368 Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants

during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of the Total Environment* 669, 1019–1032.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>

Kolde, R., Kolde, M.R., 2015. Package ‘pheatmap.’ R package 1, 790.

Kulkarni, S.J., Dhokpande, S.R., Kaware, J.P., 2014. A Review on Studies on Effect of Heavy Metals on Man and Environment. *IJRASET* 2, 227–229.

Liu, X., Zhang, J., Huang, X., Zhang, L., Yang, C., Li, E., Wang, Z., 2022a. Heavy Metal Distribution and Bioaccumulation Combined With Ecological and Human Health Risk Evaluation in a Typical Urban Plateau Lake, Southwest China. *Front Environ Sci* 10.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.814678>

Liu, X., Zhang, J., Huang, X., Zhang, L., Yang, C., Li, E., Wang, Z., Su, C., Meng, J., Zhou, Y., Bi, R., Chen, Z., Diao, J., Huang, Z., Kan, Z., Wang, T., Yuan, J., Shi, L., Li, H., Zhou, J., Zeng, L., Cheng, Y., Han, B., Gupta, N., Yadav, K.K., Kumar, V., Prasad, S., Cabral-Pinto, M.M.S., Jeon, B.H., Kumar, S., Abdellattif, M.H., Alsukaibia, A.K.D., 2022b. Heavy Metals in Soils From Intense Industrial Areas in South China: Spatial Distribution, Source Apportionment, and Risk Assessment. *Front Environ Sci* 10, 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.791052>

Luna, C., 2020. EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN GENERADA POR EL AGUA RESIDUAL TEXTIL VERTIDA AL RÍO ATOYAC EN TLAXCALA. BUAP.

Méndez-García, T., Rodríguez-Dominguez, L., Palacios-Mayorga, S., 2000. Impact of Irrigation with Polluted Water, Evaluated by the Presence of Heavy Metals in Soils. *TERRA*.

Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M.S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., Mahlke, 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>

Morales-García, S.S., Jonathan, M.P., Rodríguez-Espinosa, P.F., Barrio la Laguna Ticomá, C., Gustavo Madero, D.A., xico, M., 2014. Degree of Pollution in Water and Sediments of As, Cd, Cr, Cu, Pb and Zn in Valsequillo Dam, Puebla City, México. *IPCBE*.
<https://doi.org/10.7763/IPCBE>

Morales-García, S.S., Rodríguez-Espinosa, P.F., Shruti, V.C., Jonathan, M.P., Martínez-Tavera, E., 2017. Metal concentrations in aquatic environments of Puebla River basin, Mexico: natural and industrial influences. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 2589–2604. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8004-3>

Pérez Castresana, G., Tamariz Flores, V., López Reyes, L., Hernández Aldana, F., Castelán Vega, R., Morán Perales, J., García Suastegui, W., Díaz Fonseca, A., Handal Silva, A., 2018. Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water (Basel)* 10, 267. <https://doi.org/10.3390/w10030267>

Pérez-Castresana, G., Saldaña-Vázquez, R.A., Ibararán Viniegra, M.E., Chavarría-Hernández, J., Campos Cabral, V., Patiño Gómez, C., Martínez Austria, P., 2020. Seguridad Hídrica en la Cuenca del Alto Atoyac: estado actual y desafíos ante el cambio climático. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 11, 81–84.

- Pizarro, J., Vergara, P.M., Rodríguez, J.A., Valenzuela, A.M., 2010. Heavy metals in northern Chilean rivers: Spatial variation and temporal trends. *J Hazard Mater* 181, 747–754. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.076>
- Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., Akash, M.S.H., 2018. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *J Cell Biochem* 119, 157–184. <https://doi.org/10.1002/jcb.26234>
- Rodríguez-Espinoza, P.F., Shruti, V.C., Jonathan, M.P., Martínez-Tavera, E., 2018a. Metal concentrations and their potential ecological risks in fluvial sediments of Atoyac River basin, Central Mexico: Volcanic and anthropogenic influences. *Ecotoxicol Environ Saf* 148, 1020–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.068>
- Rodríguez-Espinoza, P.F., Shruti, V.C., Jonathan, M.P., Martínez-Tavera, E., 2018b. Metal concentrations and their potential ecological risks in fluvial sediments of Atoyac River basin, Central Mexico: Volcanic and anthropogenic influences. *Ecotoxicol Environ Saf* 148, 1020–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.068>
- Salcedo-Sánchez, E.R., Ocampo-Astudillo, A., Garrido-Hoyos, S.E., Martínez-Morales, M., 2020. Effects on Groundwater Quality of the Urban Area of Puebla Aquifer, in: Otazo-Sánchez, E.M., Navarro-Frómata, A.E., Singh, V.P. (Eds.), . Springer International Publishing, Cham, pp. 201–214. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24962-5_9
- Sankhla, M.S., Kumari, M., Nandan, M., Kumar, R., Agrawal, P., 2016. Heavy Metals Contamination in Water and their Hazardous Effect on Human Health-A Review. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 5, 759–766. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.510.082>
- Senesi, G.S., Baldassarre, G., Senesi, N., Radina, B., 1999. Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere* 39, 343–377. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00115-0)
- Shruti, V.C., Jonathan, M.P., Rodríguez-Espinoza, P.F., Nagarajan, R., Escobedo-Urias, D.C., Morales-García, S.S., Martínez-Tavera, E., 2017. Geochemical characteristics of stream sediments from an urban-volcanic zone, Central Mexico: Natural and man-made inputs. *Chemie der Erde* 77, 303–321. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.005>
- Soto-MontesdeOca, G., Ramirez-Fuentes, A., 2019. Value of river restoration when living near and far. The Atoyac basin in Puebla, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua* 10, 177–206. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-07>
- Su, C., Meng, J., Zhou, Y., Bi, R., Chen, Z., Diao, J., Huang, Z., Kan, Z., Wang, T., 2022. Heavy Metals in Soils From Intense Industrial Areas in South China: Spatial Distribution, Source Apportionment, and Risk Assessment. *Front Environ Sci* 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.820536>
- Tabla, J., 2019. Estudio de la optimización del proceso de biofiltración en la presa de Valsequillo, Puebla, México para la restauración parcial del Paisaje de la zona. IPN.
- Tabla-Hernández, J., Rodríguez-Espinoza, P.F., Hernandez-Ramirez, A.G., Mendoza-Pérez, J.A., Cano-Aznar, E.R., Martínez-Tavera, E., 2018. Treatment of Eutrophic water and wastewater from Valsequillo Reservoir, Puebla, Mexico by Means of Ozonation: A multiparameter approach. *Water (Switzerland)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10121790>
- Tabla-Hernandez, J., Rodriguez-Espinoza, P.F., Mendoza-Pérez, J.A., Sánchez-Ortíz, E., Martínez-Tavera, E., Hernandez-Ramirez, A.G., 2019. Assessment of potential toxic metals

454 in a Ramsar wetland, Central Mexico and its self-depuration through *Eichhornia crassipes*.
 455 Water (Switzerland) 11. <https://doi.org/10.3390/w11061248>
 456 Urrútia, G., Bonfill, X., 2010. Declaración PRISMA una propuesta para mejorar la publicación de
 457 revisiones sistemáticas y metaanálisis. Med Clin (Barc) 135, 507–511.
 458 Vareda, J.P., Valente, A.J.M., Durães, L., 2019. Assessment of heavy metal pollution from
 459 anthropogenic activities and remediation strategies: A review. J Environ Manage 246, 101–
 460 118. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.05.126>
 461 Vollmer, D., Harrison, I.J., 2021. H₂O ≠ CO₂: Framing and responding to the global water crisis.
 462 Environmental Research Letters. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd6aa>
 463 Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P.,
 464 Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., Davies, P.M., 2010. Global threats
 465 to human water security and river biodiversity. Nature 467, 555–561.
 466 <https://doi.org/10.1038/nature09440>
 467
 468