

## Arsénico en agua y su impacto en la salud mexicana

JULIO ALEJANDRO ALCOCER ZUÑIGA<sup>1</sup>, EMILIO JOAQUÍN CÓRDOVA  
ALARCÓN<sup>2</sup>, ARACELI HERNÁNDEZ ZAVALA<sup>3</sup>

### RESUMEN

**La presencia de arsénico en agua de consumo humano se ha vuelto un problema de salud pública a nivel mundial. En México, se ha reportado la exposición a este contaminante en diferentes estados de la república, y se ha asociado con diversas afectaciones a la salud.**

**Utilizando la base de datos científica PubMed, se introdujeron las palabras clave arsénico, agua y México, a fin de recopilar los estudios existentes sobre las concentraciones de arsénico en agua y los efectos en la salud en poblaciones mexicanas en diferentes estados de la República mexicana con problemas de hidroarsenicismo. Después del análisis se encontró asociación con enfermedades metabólicas y cardiopulmonares, así como indicios de daño renal y del ADN.**

**Todo esto muestra la necesidad de contar con estrategias de remoción y, sobre todo, políticas públicas más estrictas y aplicables que puedan ayudar a mejorar la salud pública en nuestro país.**

**Palabras clave:** Arsénico, Agua, Biomarcador, Salud, México.

<sup>1</sup>Químico Farmacéutico Biólogo, Sección de Investigación y Posgrado, Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, [julio.aaz.97@gmail.com](mailto:julio.aaz.97@gmail.com), ORCID: [0000-0001-9563-5989](https://orcid.org/0000-0001-9563-5989).

<sup>2</sup>Doctor en Biomedicina, Laboratorio de Consorcio Genómica. Instituto Nacional de Medicina Genómica, Ciudad de México, México, [ecordova@inmegen.gob.mx](mailto:ecordova@inmegen.gob.mx), ORCID: [0000-0002-7556-3137](https://orcid.org/0000-0002-7556-3137).

<sup>3</sup>Doctora en Toxicología, Sección de Investigación y Posgrado, Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, [araheza17@gmail.com](mailto:araheza17@gmail.com), ORCID: [0000-0002-0848-2970](https://orcid.org/0000-0002-0848-2970).

**Autor de Correspondencia:** Araceli Hernández Zavala, [araheza17@gmail.com](mailto:araheza17@gmail.com),

**Recibido:** 16 / 04 / 2024

**Aceptado:** 10 / 09 / 2024

**Publicado:** 1 / 11 / 2024

#### Cómo citar este artículo:

Alcocer Zuñiga, J. A., Córdova Alarcón, E. J., & Hernández-Zavala, A. Arsénico en agua y su impacto en la salud mexicana. *EPISTEMUS*, 18(37), e3701374. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.374>

## Arsenic in water and its impact in Mexican health

### ABSTRACT

***The presence of Arsenic in water for human consumption has become a global public health issue. In Mexico, exposure to this contaminant has been reported in various states of republic and has been associated with several health problems.***

***Using the PubMed scientific database, the keywords arsenic, water and Mexico were entered in order to compile existing studies on arsenic concentrations in water and the health effects on Mexican populations in different states of the Mexican Republic with hydroarsenicism issues.***

***After analysis, associations with metabolic and cardiopulmonary diseases were found, as well as the presence of renal and DNA damage.***

***All this highlights the need to have removal strategies and, above all, stricter and more enforceable public policies to help improve public health in our country.***

***Key words: Arsenic, Water, Biomarker, Health, Mexico***





## Introducción

Los seres humanos estamos en constante exposición a una gran diversidad de contaminantes, escenario en el que los metales pesados pueden tomar un papel protagónico. El arsénico es uno de los elementos químicos más usados por la industria, por lo que el estudio de su impacto en la salud humana resulta de interés entre toxicólogos y demás científicos del área de la medicina y ciencias de la salud. A su vez, México es un país que históricamente se ha caracterizado por una gran industria minera y fundidora de metales, así como de contaminación de mantos acuíferos, los cuales de forma natural ya contienen pequeñas cantidades de arsénico. Existen una gran cantidad de estudios científicos destinados al análisis de los efectos tóxicos observados en poblaciones mexicanas expuestas a agua con altas concentraciones de este contaminante. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es recopilar aquellos estudios científicos que reporten alteraciones fisiológicas y enfermedades en dichas poblaciones mexicanas.

## Desarrollo

### Generalidades del arsénico

El Arsénico (As) es un elemento químico del grupo 5A con número atómico 33 que se ha clasificado como metaloide debido a que comparte propiedades químicas y fisicoquímicas tanto con los metales como con los no metales. Sus estados de oxidación predominantes son: +3 (Arsenito, As+3) y +5 (Arsenato, As+5), aunque también se encuentra en menor proporción en los estados de oxidación -3 y 0 [1].



Estos iones se encuentran comúnmente asociados con otros elementos, como oxígeno, cloro o azufre para generar compuestos arsenicales inorgánicos (Asi) tales como el trióxido de arsénico; o bien, asociados con carbono e hidrógeno para generar compuestos arsenicales orgánicos tales como la arsenobetaina, la arsenocolina o los compuestos metilados. Todos estos compuestos arsenicales son difíciles de identificar a simple vista en agua, suelo o aire ya que suelen ser, en su mayoría, incoloros, blancos o grises, además de que no cuentan con algún sabor u olor característico [2].

### **Usos del arsénico**

A lo largo de la historia se ha establecido una gran variedad de aplicaciones para el arsénico. El principal uso destacado es el de la fabricación de aleaciones, específicamente aquellas con plomo destinadas a la generación de baterías de automóviles [3]. El arseniuro de galio es ampliamente usado en la fabricación de semiconductores, ya que se generan materiales termo resistentes con buena conductividad eléctrica [4]. Durante muchos años se utilizaron compuestos arsenicales como componentes de la formulación de diversos plaguicidas, especialmente ácido cacodílico (compuesto arsenical metilado) en los cultivos de algodón [5]. Incluso en los 90 se utilizó el arseniato de cobre cromado (CCA) como preservante de madera, se trata de un material que libera al ambiente tanto arsénico como cobre, lo que resulta en un gran impacto ambiental y a la salud, sobre todo en infantes [6].





## **Fuentes naturales y antropogénicas**

Los compuestos arsenicales se generan de manera natural principalmente a partir de la actividad volcánica y de la volatilización de exudados en los suelos y sedimentos. Posteriormente, este arsénico en el aire precipita hacia suelos, ríos, lagos y mares a través de la lluvia, por lo que el agua representa la principal matriz biológica de exposición al arsénico. En cuanto a las actividades antropogénicas, destacan la minería, fundición, quema de combustibles fósiles y la industria química, las cuales también emiten arsénico hacia el aire o directamente a los cuerpos de agua. Por tanto, es común encontrar altos niveles de arsénico no solo en agua, sino también en aire y suelos. Es importante destacar que, tanto las fuentes naturales como las antropogénicas interactúan en diferentes momentos del ciclo de contaminación del arsénico, lo que genera en conjunto un problema a escala mundial [7].

## **Arsénico en aguas de México**

México es uno de los principales países en donde las concentraciones de arsénico en agua representan una amenaza para la población a través del consumo de agua contaminada. Aunado a esto, resulta alarmante que, mientras la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un límite máximo recomendado de 10 µg de Arsénico por litro de agua [8], en México la Norma Oficial NOM-127-SSA1-1994 lo establece en 25 µg de Arsénico por litro de agua [9]. En la Tabla 1 se muestran algunos de los niveles máximos permisibles de Arsénico en agua de diferentes países.



**Tabla 1. Diferentes niveles máximos permisibles de Arsénico en agua**

País / Organismo	Nivel permisible de Arsénico en agua (µg/L)	Referencia
OMS	10	[8]
Estados Unidos	10	[10]
Unión Europea	10	[11]
México (PROY NOM-250-SSA1-2014 Cancelado)	10	[12]
México (NOM-127-SSA1-1994)	25	[9]
China	50	[13]

**Tabla 2. Diferentes concentraciones de Arsénico en aguas de México**

Estado de la República	Tipo de agua	Nivel de Arsénico en agua (µg/L)	Referencia
Sinaloa	Río	6.64 – 35.9	[14]
Guanajuato	Arroyos	14.7 – 47.2	[15]
	Pozos	23.2 – 26.9	
	Manantiales	81.5 – 121	
Morelos	Agua de minas	85 – 152	[16]
	Agua de consumo	1.84 – 11.9	
	Manantiales	18.1 – 50.2	
	Río	8.5 – 14.4	
Zacatecas	Subterránea	0.49 – 241.3	[17]
Baja California Sur	Subterránea	60 – 1290	[18]
San Luis Potosí	Agua de riego	7750 – 8680	[19]

En México, se ha llevado a cabo un sinnúmero de estudios destinados a la cuantificación de Arsénico en diferentes cuerpos de agua, como lo son las superficiales, las subterráneas y de consumo humano directo. En la Tabla 2 se muestran algunos de los más recientes trabajos al respecto.





## **Exposición humana**

Debido a esta gran distribución del Arsénico en el medio, los seres humanos estamos expuestos de diferentes maneras al Arsénico. Es común la ingesta de alimentos y agua contaminada, el contacto directo de la piel con suelos y agua, o la inhalación de aire con alto contenido de arsénico. Se reporta que el arsénico ingresa al organismo a través de estas tres vías de exposición. La disposición del Asi se define como las acciones compuestas de su absorción, biotransformación y eliminación.

## **Absorción**

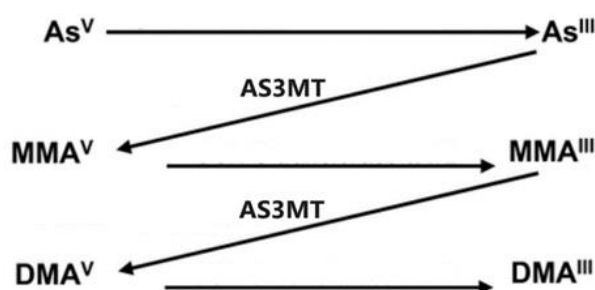
A nivel molecular, el Asi ingresa a las células a través de diferentes mecanismos dependiendo de su estado de oxidación: arsenato (+5), a través de los llamados transportadores de fosfatos debido a la similitud estructural que comparten con dichos iones; el arsenito (+3) atraviesa principalmente por acuaporinas (canales de agua presentes en las células), y es el intestino delgado el órgano responsable de la mayor parte de esta absorción [20].

## **Biotransformación**

El estudio del metabolismo del arsénico ha cambiado por completo el panorama del impacto de este contaminante en el cuerpo humano, ya que los metabolitos metilados que se generan pueden tener un mecanismo tóxico diferente al del Asi. Este proceso de biotransformación ocurre principalmente en el hígado, ya que aquí es donde encuentra mayoritariamente la enzima encargada de la metilación: la arsenito metil-transferasa, o arsénico-3 metil-transferasa (AS3MT). De manera



general, el arsenito (+3) es metilado por la enzima AS3MT para generar el ácido monometilarsónico (MMA +5). Este último metabolito es reducido para generar el correspondiente monometilado trivalente (MMA +3), el cual a su vez es nuevamente metilado por la AS3MT para dar lugar a la generación del ácido dimetilarsínico (DMA +5), que posteriormente es también reducido a la respectiva especie trivalente (DMA +3) [1], [21]. Este proceso se resume en la Figura 1.



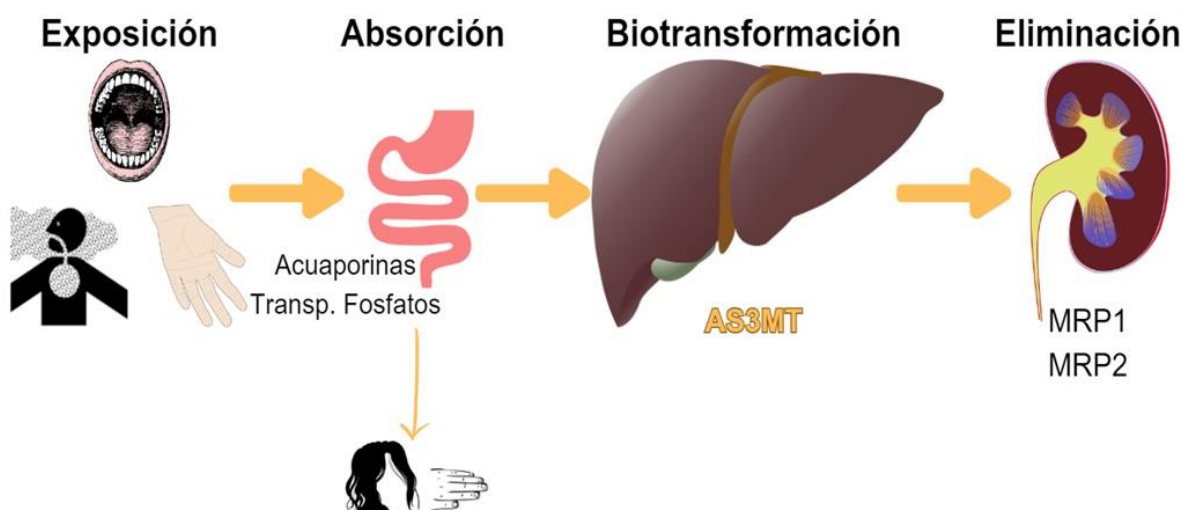
**Figura 1. Biotransformación del Arsénico.** Modificado de D. C. Ellinsworth [21].

### Eliminación (excreción)

Todas estas especies arsenicales generadas son excretadas a través de unas proteínas denominadas MRP1 y MRP2 (del inglés: Multidrug Resistance Associated Protein 1 y 2). Cerca del 45 % del Asi que ingresa al organismo es eliminado a través de la orina. Los porcentajes restantes pueden acumularse en hígado, cabello, uñas o vejiga, o bien ser excretados a través de la bilis. El DMA es la especie encontrada en mayor proporción en orina (60-80 %) en contraste con MMA y Asi (ambos 5-20 %) [20], [22]. Como se verá a continuación, los cambios en la proporción de esta mezcla de metabolitos en orina pueden ser indicativos de efectos graves en la salud. En la Figura 2 se resume el proceso general de la toxicocinética del arsénico.







**Figura 2. Toxicocinética del Arsénico.**

### Efectos en la salud

La exposición a arsénico se ha asociado a una gran cantidad de afectaciones a la salud en prácticamente todos los sistemas del cuerpo humano. La exposición aguda, es decir, menor a 24 horas, por vía oral, se asocia a mareos, vómitos o dolor abdominal, mientras que la exposición dérmica e inhalatoria se asocian a irritación, disnea y mareos. Por otro lado, en la exposición crónica (meses a años), se han asociado tanto a padecimientos no cancerígenos, como a 6 tipos de cáncer: pulmón, piel, vejiga, riñón, hígado y próstata [1], [23].

Por esta razón, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, del inglés: International Agency for Research on Cancer) clasifica al arsénico como un contaminante de Grupo 1, es decir, un carcinogénico para los humanos [24]. En la Tabla 3 se muestra la clasificación de agentes de la IARC con algunos ejemplos.

**Tabla 3. Clasificación de agentes por la IARC**

Grupo	Denominación	Ejemplos
1	Carcinogénico para humanos	Uranio, cadmio, tabaco (fumar), etanol (bebidas), arsénico inorgánico, lindano
2a	Probable carcinogénico para humanos	Glifosato, plomo inorgánico, esteroides anabólicos, malatión
2b	Posible carcinogénico para humanos	Diesel, gasolina, antraceno, níquel
3	No clasificable	Cafeína, arsenobetaina, tolueno

### Efectos en la salud mexicana

En México, se ha asociado la exposición a arsénico con diversos efectos en la salud en varios estados del país con elevados niveles de arsénico en agua, sobre todo en el norte y centro del país. En la Tabla 4 se muestran algunos de los más recientes trabajos al respecto.

La diabetes mellitus tipo 2 (DM2), uno de los principales problemas de salud en México, es un padecimiento en el que la glucosa no ingresa eficazmente a las células; la obesidad y el índice de masa corporal (IMC) son los factores de riesgo predominantes [25]. En una población de Zimapán, Hidalgo, se encontró que la diabetes está asociada directamente con la exposición a arsénico en agua y con el metabolito dimetilado en orina [26]. En el trabajo de Bommarito y colaboradores [27] se encontró una correlación entre valores altos del índice de masa corporal (IMC) y niveles elevados del metabolito DMA en orina de personas en Chihuahua. En la Comarca lagunera, una región con extensa historia de arsenicismo se ha asociado la exposición a arsénico en agua con el riesgo de padecer obesidad y diabetes [28].

En el artículo de Mendez y colaboradores [29] se encontró asociación con diabetes





y altos niveles de triglicéridos y colesterol a diferentes niveles de exposición de arsénico en una población de Chihuahua. En este estado también se ha reportado relación directa con diabetes [30] y alteraciones metabólicas [31]; además se encontró que en estos casos había un incremento en la proporción del metabolito DMA en orina. Estos estudios confirman la importancia del análisis toxicocinético del arsénico.

Los altos niveles de triglicéridos y colesterol en sangre conducen a su vez a diversos padecimientos cardiovasculares [32]. En la Comarca Lagunera también se ha reportado riesgo de hipertensión por la exposición a arsénico en agua [28]. En un estudio realizado en niños de Zimapán, Hidalgo, se encontró un aumento en los niveles de biomarcadores de insuficiencia cardiaca (péptido natriurético B, BNP) debido a su exposición a arsénico, además de que esta asociación también se daba con los metabolitos metilados [33].

Todas estas afecciones ya mencionadas se relacionan a su vez con las enfermedades respiratorias. En la Comarca Lagunera se encontró una reducción en el volumen de aire exhalado en niños expuestos a arsénico en agua, varios de los cuales ya contaban con restricción pulmonar [34]. En esta misma población también se encontró asociación con el incremento en los niveles de un biomarcador de inflamación (metaloproteinasa 9, MMP-9), así como con el porcentaje de DMA en orina [35]. Similarmente, se han reportado niveles elevados de MMP-9 en niños de comunidades Yaqui en Sonora [36].



A nivel genético, muchos de estos efectos en la salud también pueden deberse a que el arsénico causa daño al ácido desoxirribonucleico (ADN). De manera general, se define a la genotoxicidad como la capacidad de las sustancias para dañar el material genético de los organismos [37]. En Coahuila se ha reportado la fragmentación del ADN de leucocitos de pobladores expuestos a Arsénico en agua [38]. Resultados similares se encontraron en células bucales de pobladores expuestos de Baja California Sur [39]. Interesantemente, en niños de La Comarca se ha reportado conjuntamente genotoxicidad y reducción en la capacidad de reparación del ADN de linfocitos [40]. Este efecto conjunto también se ha detectado en pobladores expuestos de Sonora [41]. Incluso la longitud de telómeros (región distal de los cromosomas) se ha visto alterada nuevamente en pobladores de la Comarca [42].

En cuanto a la toxicidad reproductiva, se ha reportado en México la disminución en la fecundidad en mujeres de Sonora [43], cambio en la expresión de genes involucrados en el correcto nacimiento [44], la placenta como ruta temprana de exposición a arsénico [45] o el paso a través del cordón umbilical en función del metabolismo del grupo metilo en la madre [46].

Existen muchos otros estudios sobre los efectos del arsénico en la salud de poblaciones mexicanas como los son las alteraciones en el metabolismo y excreción del grupo hemo de la hemoglobina [47], [48], apoptosis de células inmunes en niños de Durango [49] o biomarcadores de daño renal en San Luis Potosí [50].



**Tabla 4. Efectos en la salud mexicana por exposición a arsénico**

<b>Estado de la República</b>	<b>Hallazgos observados</b>	<b>Referencia</b>
Baja California Sur	Genotoxicidad en células epiteliales bucales	[39]
Sonora	Inflamación pulmonar en niños	[36]
	Afectación en la reparación del ADN	[41]
	Disminución en la fecundidad en mujeres	[43]
Chihuahua	Asociación con diabetes, trigliceridemia y colesterolemia	[29]
	Asociación con el IMC	[27]
	Asociación con diabetes y alteración metabólica	[30], [31]
Coahuila	Obesidad, diabetes e hipertensión	[28]
	Paso a través de la placenta	[45]
	Inflamación y mala función pulmonar	[35]
	Función pulmonar	[34]
	Genotoxicidad	[38]
	Longitud de telómeros	[42]
	Alteración en el metabolismo y excreción del grupo hemo	[47], [48]
	Diabetes	[26]
Durango	Genotoxicidad y reducción de la reparación	[40]
	Paso por cordón umbilical en función del metabolismo del grupo metilo.	[46]
	Apoptosis en células mononucleares	[49]
San Luis Potosí	Epigenética de genes involucrados en el nacimiento	[44]
	Daño renal	[50]
Hidalgo	Niveles elevados de BNP	[33]

Es importante señalar que esta compilación solo está centrada en aquellos estudios que mencionan explícitamente la exposición a agua con arsénico, lo cual muestra un panorama adverso más complejo en el que aún falta contemplar la exposición inhalatoria y dérmica.

## Conclusión

El arsénico es un contaminante tóxico para los seres humanos, cuya principal matriz biológica es el agua y su principal ruta de exposición es la vía oral. En base al análisis de la literatura se ha encontrado evidencia en diferentes estados del país de altos niveles de arsénico en agua, así como de la toxicidad del arsénico en diversos órganos y sistemas lo que conduce a un elevado número de afectaciones a la salud; además, en estos mecanismos bioquímicos el metabolismo de dicho contaminante puede jugar un papel protagónico. Estos hallazgos permiten afirmar que el arsenicismo en México es un severo problema de salud pública que requiere atención inmediata.

## Reconocimientos

Los autores reconocen el apoyo económico otorgado por el Instituto Politécnico Nacional a través de la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI).

## Referencias

- [1] I. W. G. on the E. of C. R. to. Humans, “Arsenic, Metals, Fibres and Dusts”, 2012.
- [2] Atsdr, “Toxicological profile for arsenic”, ago. 2007, doi: 10.15620/CDC:11481.
- [3] R. W. Kapp, “Arsenic: Toxicology and Health Effects”, *Encyclopedia of Food and Health*, pp. 256–265, ene. 2016, DOI: 10.1016/B978-0-12-384947-2.00043-X.





- [4] J. S. Blakemore, “Semiconducting and other major properties of gallium arsenide”, *J Appl Phys*, vol. 53, núm. 10, pp. R123–R181, oct. 1982, DOI: 10.1063/1.331665.
- [5] V. Bencko y F. Y. L. Foong, “The history of arsenical pesticides and health risks related to the use of Agent Blue”, *Ann Agric Environ Med*, vol. 24, núm. 2, pp. 312–316, 2017, DOI: 10.26444/AAEM/74715.
- [6] P. S. Nico, S. E. Fendorf, Y. W. Lowney, S. E. Holm, y M. V. Ruby, “Chemical structure of arsenic and chromium in CCA-treated wood: Implications of environmental weathering”, *Environ Sci Technol*, vol. 38, núm. 19, pp. 5253–5260, oct. 2004, DOI: 10.1021/ES0351342/SUPPL\_FILE/ES0351342SI20040831\_112112.PDF.
- [7] K. S. Patel *et al.*, “A review on arsenic in the environment: contamination, mobility, sources, and exposure”, *RSC Adv*, vol. 13, núm. 13, pp. 8803–8821, mar. 2023, DOI: 10.1039/D3RA00789H.
- [8] “Fourth edition incorporating the first and second addenda Guidelines for drinking-water quality”.
- [9] “DOF - Diario Oficial de la Federación”. Consultado: el 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0)
- [10] U. Environmental Protection Agency y O. of Water, “2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables (EPA 822-F-18-001)”, 2018.
- [11] “Directive - 2020/2184 - EN - EUR-Lex”. Consultado: el 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32020L2184>
- [12] “DOF - Diario Oficial de la Federación”. Consultado: el 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en:





- [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5546443&fecha=13/12/2018#gs.c.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5546443&fecha=13/12/2018#gs.c.tab=0)
- [13] “The National Standards of the People’s Republic of China”. Consultado: el 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://english.mee.gov.cn/SOE/soechina1997/water/standard.htm>
- [14] F. Páez-Osuna *et al.*, “Heavy metals in waters and suspended sediments affected by a mine tailing spill in the upper San Lorenzo River, Northwestern México”, *Bull Environ Contam Toxicol*, vol. 94, núm. 5, pp. 583–588, mayo 2015, doi: 10.1007/S00128-015-1473-0.
- [15] V. M. Escot-Espinoza, Y. R. Ramos-Arroyo, I. Lázaro, I. Montes-Avila, L. Carrizalez-Yañez, y R. Briones-Gallardo, “Presence of Arsenic in Potential Sources of Drinking Water Supply Located in a Mineralized and Mined Area of the Sierra Madre Oriental in Mexico”, *Toxics*, vol. 9, núm. 11, nov. 2021, doi: 10.3390/TOXICS9110307.
- [16] A. Barats *et al.*, “Tracing source and mobility of arsenic and trace elements in a hydrosystem impacted by past mining activities (Morelos state, Mexico)”, *Sci Total Environ*, vol. 712, abr. 2020, DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.135565.
- [17] C. Avila-Sandoval, H. Júnez-Ferreira, J. González-Trinidad, C. Bautista-Capetillo, A. Pacheco-Guerrero, y E. Olmos-Trujillo, “Spatio-Temporal Analysis of Natural and Anthropogenic Arsenic Sources in Groundwater Flow Systems”, *Int J Environ Res Public Health*, vol. 15, núm. 11, nov. 2018, DOI: 10.3390/IJERPH15112374.
- [18] A. Carrillo-Chávez, J. I. Drever, y M. Martínez, “Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio-El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico”, *Cases and solutions Environmental Geology*, vol. 39, núm. 11, 2000.
- [19] E. A. Ruíz-Huerta *et al.*, “Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico”, *J Hazard Mater*, vol. 339, pp. 330–339, 2017, DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2017.06.041.







- [20] T. Watanabe y S. Hirano, “Metabolism of arsenic and its toxicological relevance”, *Arch Toxicol*, vol. 87, núm. 6, pp. 969–979, jun. 2013, DOI: 10.1007/S00204-012-0904-5.
- [21] D. C. Ellinsworth, “Arsenic, reactive oxygen, and endothelial dysfunction”, *J Pharmacol Exp Ther*, vol. 353, núm. 3, pp. 458–464, jun. 2015, DOI: 10.1124/JPET.115.223289.
- [22] Z. Drobna, M. Styblo, y D. J. Thomas, “An Overview of Arsenic Metabolism and Toxicity”, *Curr Protoc Toxicol*, vol. 42, núm. 431, nov. 2009, DOI: 10.1002/0471140856.TX0431S42.
- [23] “Arsenic”. Consultado: el 13 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- [24] “List of Classifications – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans”. Consultado: el 13 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- [25] M. Aras, B. G. Tchang, y J. Pape, “Obesity and Diabetes”, *Nurs Clin North Am*, vol. 56, núm. 4, pp. 527–541, dic. 2021, DOI: 10.1016/J.CNUR.2021.07.008.
- [26] L. M. Del Razo *et al.*, “Exposure to arsenic in drinking water is associated with increased prevalence of diabetes: a cross-sectional study in the Zimapán and Lagunera regions in Mexico”, *Environ Health*, vol. 10, núm. 1, 2011, DOI: 10.1186/1476-069X-10-73.
- [27] P. A. Bommarito *et al.*, “One-carbon metabolism nutrient intake and the association between body mass index and urinary arsenic metabolites in adults in the Chihuahua cohort”, *Environ Int*, vol. 123, pp. 292–300, feb. 2019, DOI: 10.1016/J.ENVINT.2018.12.004.
- [28] B. L. Sánchez-Rodríguez, I. Castillo-Maldonado, D. Pedroza-Escobar, D. Delgadillo-Guzmán, y M. F. Soto-Jiménez, “Association of obesity, diabetes, and hypertension with arsenic in drinking water in the Comarca Lagunera province (north-central Mexico)”, *Sci Rep*, vol. 13, núm. 1, dic. 2023, DOI: 10.1038/S41598-023-36166-5.



- [29] M. A. Mendez *et al.*, “Chronic Exposure to Arsenic and Markers of Cardiometabolic Risk: A Cross-Sectional Study in Chihuahua, Mexico”, *Environ Health Perspect*, vol. 124, núm. 1, pp. 104–111, ene. 2016, DOI: 10.1289/EHP.1408742.
- [30] J. M. Currier *et al.*, “Associations between arsenic species in exfoliated urothelial cells and prevalence of diabetes among residents of Chihuahua, Mexico”, *Environ Health Perspect*, vol. 122, núm. 10, pp. 1088–1094, oct. 2014, DOI: 10.1289/EHP.1307756.
- [31] E. Martin *et al.*, “Metabolomic characteristics of arsenic-associated diabetes in a prospective cohort in Chihuahua, Mexico”, *Toxicol Sci*, vol. 144, núm. 2, pp. 338–346, abr. 2015, DOI: 10.1093/TOXSCI/KFU318.
- [32] “Cardiovascular diseases (CVDs)”. Consultado: el 13 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- [33] J. M. Torres-Arellano *et al.*, “Natriuretic peptides and echocardiographic parameters in Mexican children environmentally exposed to arsenic”, *Toxicol Appl Pharmacol*, vol. 403, sep. 2020, DOI: 10.1016/J.TAAP.2020.115164.
- [34] R. Recio-Vega, T. Gonzalez-Cortes, E. Olivas-Calderon, R. C. Lantz, A. J. Gandolfi, y C. G. De Alba, “In utero and early childhood exposure to arsenic decreases lung function in children”, *J Appl Toxicol*, vol. 35, núm. 4, pp. 358–366, abr. 2015, DOI: 10.1002/JAT.3023.
- [35] E. Olivas-Calderón *et al.*, “Lung inflammation biomarkers and lung function in children chronically exposed to arsenic”, *Toxicol Appl Pharmacol*, vol. 287, núm. 2, pp. 161–167, sep. 2015, DOI: 10.1016/J.TAAP.2015.06.001.
- [36] C. B. Vega-Millán *et al.*, “Inflammation biomarkers associated with arsenic exposure by drinking water and respiratory outcomes in indigenous children from three Yaqui villages in southern Sonora, México”, *Environ Sci Pollut Res Int*, vol. 28, núm. 26, pp. 34355–34366, jul. 2021, DOI: 10.1007/S11356-021-13070-X.





- [37] D. H. Phillips y V. M. Arlt, “Genotoxicity: damage to DNA and its consequences”, *EXS*, vol. 99, pp. 87–110, 2009, DOI: 10.1007/978-3-7643-8336-7\_4.
- [38] J. Jiménez-Villarreal *et al.*, “Detection of damage on single- or double-stranded DNA in a population exposed to arsenic in drinking water”, *Genet Mol Res*, vol. 16, núm. 2, mayo 2017, DOI: 10.4238/GMR16029241.
- [39] C. Vazquez Boucard *et al.*, “A study of DNA damage in buccal cells of consumers of well- and/or tap-water using the comet assay: Assessment of occupational exposure to genotoxicants”, *Environ Mol Mutagen*, vol. 58, núm. 8, pp. 619–627, oct. 2017, DOI: 10.1002/EM.22111.
- [40] J. Méndez-Gómez *et al.*, “Genotoxic effects of environmental exposure to arsenic and lead on children in region Lagunera, Mexico”, *Ann N Y Acad Sci*, vol. 1140, pp. 358–367, 2008, DOI: 10.1196/ANNALS.1454.027.
- [41] A. S. Andrew *et al.*, “Arsenic exposure is associated with decreased DNA repair in vitro and in individuals exposed to drinking water arsenic”, *Environ Health Perspect*, vol. 114, núm. 8, pp. 1193–1198, ago. 2006, DOI: 10.1289/EHP.9008.
- [42] J. Jimenez Villarreal *et al.*, “Telomere length analysis in residents of a community exposed to arsenic”, *J Biochem Mol Toxicol*, vol. 33, núm. 1, ene. 2018, DOI: 10.1002/JBT.22230.
- [43] R. Rivera Carvajal, H. Duarte-Tagles, y Á. J. Idrovo, “Mining leachate contamination and subfecundity among women living near the USA-Mexico border”, *Environ Geochem Health*, vol. 41, núm. 5, pp. 2169–2178, oct. 2019, DOI: 10.1007/S10653-019-00275-W.
- [44] D. Rojas *et al.*, “Prenatal arsenic exposure and the epigenome: identifying sites of 5-methylcytosine alterations that predict functional changes in gene expression in newborn cord blood and subsequent birth outcomes”, *Toxicol Sci*, vol. 143, núm. 1, pp. 97–106, ene. 2015, DOI: 10.1093/TOXSCI/KFU210.



- [45] J. J. García Salcedo *et al.*, “Comparative Biomonitoring of Arsenic Exposure in Mothers and Their Neonates in Comarca Lagunera, Mexico”, *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, núm. 23, dic. 2022, DOI: 10.3390/IJERPH192316232.
- [46] J. E. Laine *et al.*, “Maternal one carbon metabolism and arsenic methylation in a pregnancy cohort in Mexico”, *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 28, núm. 5, pp. 505–514, sep. 2018, DOI: 10.1038/S41370-018-0041-1.
- [47] A. Hernández-Zavala *et al.*, “Altered activity of heme biosynthesis pathway enzymes in individuals chronically exposed to arsenic in Mexico”, *Arch Toxicol*, vol. 73, núm. 2, pp. 90–95, 1999, DOI: 10.1007/S002040050592.
- [48] A. Hernández-Zavala, L. M. Del Razo, C. Aguilar, G. G. García-Vargas, V. H. Borja, y M. E. Cebrián, “Alteration in bilirubin excretion in individuals chronically exposed to arsenic in Mexico”, *Toxicol Lett*, vol. 99, núm. 2, pp. 79–84, oct. 1998, DOI: 10.1016/S0378-4274(98)00115-5.
- [49] D. O. Rocha-Amador, J. Calderón, L. Carrizales, R. Costilla-Salazar, y I. N. Pérez-Maldonado, “Apoptosis of peripheral blood mononuclear cells in children exposed to arsenic and fluoride”, *Environ Toxicol Pharmacol*, vol. 32, núm. 3, pp. 399–405, nov. 2011, DOI: 10.1016/J.ETAP.2011.08.004.
- [50] M. Cárdenas-González *et al.*, “Environmental exposure to arsenic and chromium in children is associated with kidney injury molecule-1”, *Environ Res*, vol. 150, pp. 653–662, oct. 2016, DOI: 10.1016/J.ENVRES.2016.06.032.

**Cómo citar este artículo:**

Alcocer Zuñiga, J. A., Córdova Alarcón, E. J., & Hernández-Zavala, A. Arsénico en agua y su impacto en la salud mexicana. *EPISTEMUS*, 18(37), e3701374. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.374>

