

## Los geomateriales y su uso potencial como adsorbentes para remediar aguas contaminadas con arsénico

Geomaterials and their potential use as adsorbents to remediate arsenic-contaminated water

German R. Hernández-González<sup>1</sup>, María V. Espinoza-Ortiz<sup>1</sup>, Alejandro M. Ramírez-Rosales<sup>1</sup>, Ana G. Araujo-Ortiz<sup>1</sup>, Zarah N. Galván-Mejía<sup>1</sup>, Ernesto J. Navarro-Pérez<sup>1</sup>, Gabriela A. Zanor<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Licenciatura en Ingeniería Ambiental e Ingeniería en Energías Renovables. Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

\*gzanor@ugto.mx

### Resumen

La presencia de arsénico (As) en el agua es una problemática creciente a nivel mundial que amenaza el derecho humano al acceso al agua potable segura, saneamiento e higiene. Especialmente en México, en algunas regiones donde las personas utilizan los acuíferos como la única fuente de agua para consumo humano, se han encontrado concentraciones de As que rebasan los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (0.01 ppm) y por la NOM-127-SSA1-2021(0.025 ppm disminuyendo gradualmente hasta 0.01 ppm). Particularmente, Guanajuato destaca como uno de los principales estados del país en donde se han reportado altas concentraciones de As en el agua para consumo humano. El As es un metaloide ampliamente distribuido en el medio ambiente, cierta cantidad del As proviene de fuentes naturales particularmente de la meteorización y las erupciones volcánicas; mientras que la parte restante se deriva de actividades antropogénicas, tales como el uso de productos químicos agrícolas y algunos procesos industriales. Debido a su toxicidad (específicamente de sus compuestos trivalentes e inorgánicos), la exposición al agua contaminada por este elemento representa un peligro para la salud humana, la calidad de vida de las personas y para el desarrollo de las sociedades. Por esta razón se han propuesto tecnologías para remediar el agua contaminada con este metaloide, tales como la coagulación, el intercambio iónico y la adsorción. Sin embargo, dado que algunas de estas tecnologías no son viables en países con economías emergentes por los altos costos de operación y mantenimiento, en los últimos años la adsorción con geomateriales ha tomado relevancia como una solución sostenible para remover al As del agua en regiones geográficas remotas con escasos recursos económicos. El presente artículo de divulgación tiene como objetivo presentar un panorama actual a nivel mundial, nacional y estatal sobre la problemática del As en el agua para uso y consumo humano, así como una revisión bibliográfica de algunas tecnologías emergentes y convencionales para la purificación del agua contaminada con As. Se enfatiza en la adsorción usando geomateriales con especial atención en ciertos trabajos de investigación en donde se han utilizado estos recursos de bajo costo, como la caliza, la zeolita y el caolín.

**Palabras clave:** materiales adsorbentes naturales, contaminación, tecnologías sostenibles, purificación del agua

### Problemática del arsénico en el mundo

La disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población, debido a que repercute directamente en la salud, el bienestar y el desarrollo de las sociedades. Sin embargo, los países del mundo se enfrentan a retos cada vez mayores relacionados con la escasez y la contaminación de agua (Naciones Unidas, 2020), ocasionados principalmente por el crecimiento acelerado de la población y la urbanización, así como, la apesurada y desmedida industrialización. Particularmente, el deterioro en la calidad de este recurso hídrico por la presencia de diversos tipos de contaminantes como el As, hoy en día está catalogada como una problemática medioambiental y sanitaria de alcance mundial (Bundschuh et al., 2022), siendo las principales fuentes de exposición el agua de bebida, los cultivos regados y alimentos preparados con agua contaminada (OMS, 2022).

Específicamente, en los países en desarrollo y de bajos recursos, el impacto por el aumento de la contaminación del agua por la presencia de As resulta desafiante, dado que no cuentan con los suficientes recursos económicos para que toda la población tenga acceso a sistemas de agua potable y de saneamiento. Esto ha conllevado al aumento de la probabilidad de contraer enfermedades relacionadas con el agua contaminada. La OMS calculó que 844 millones de personas a nivel mundial no disponen de una fuente básica de agua potable, y aproximadamente, 1.6 millones de personas mueren cada año de enfermedades prevenibles relacionadas con el agua contaminada (Joseph et al., 2019).

De acuerdo con la OMS (2022), el límite máximo permisible recomendado de As en el agua para consumo humano es de 0.01 ppm. Sin embargo, existen varias regiones en el mundo (Figura 1), como Argentina, Bangladesh, Camboya, Chile, China, los Estados Unidos de América, la India, México, Pakistán y Vietnam donde existen graves problemas relacionados a los altos niveles de concentración de As en el agua bebida. Se estima que 140 millones de personas de al menos 70 países han estado bebiendo agua con niveles de As superiores al establecido por la OMS (OMS, 2022).



Figura 1. Países con altas concentraciones de As en el agua para uso y consumo humano. Elaboración propia.

### Presencia y contaminación del Arsénico en México y Guanajuato

En América Latina se ha reconocido una problemática por la presencia de As en diferentes ambientes (aguas subterráneas, aguas superficiales, suelo y sedimentos) (Bundschuh et al., 2020). En el caso de México, la exposición de As debido a sus altas concentraciones en aguas subterráneas se ha reportado en varios lugares del país, destacándose los estados de Baja California, Durango, Aguascalientes, Zacatecas Guanajuato, Sonora, Chihuahua, Chiapas, Coahuila, Nuevo León, Sinaloa, San Luis Potosí, Jalisco, Michoacán, Querétaro, Hidalgo y Puebla (Bundschuh et al., 2008).

Aunque el problema del As en el agua para consumo humano en México es extendido, existen regiones más afectadas, principalmente las zonas urbanas densamente pobladas y comunidades rurales remotas ubicadas en el norte y centro del país en donde el agua subterránea sirve como principal fuente de agua potable (Juárez-Aparicio et al., 2024; Cortés et al., 2012). Para el año 2018, se estimó que alrededor de 1.5 millones de personas (1.27 % de la población total para ese año) habían ingerido agua que contenía más de 0.025 ppm, y alrededor de 150.000 personas de 0.075 a 0.5 ppm (Bundschuh et al., 2020).

De acuerdo con la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad de Aguas Nacionales (RENAMECA; Comisión Nacional del Agua, CONAGUA), en el año 2020 se contaba con 1,068 sitios de monitoreo en los cuerpos de agua subterráneas que reportaban las concentraciones de As y otros elementos tóxicos. Según los resultados obtenidos en dicho año, en México el 76.4 % de los sitios (816) presentaban concentraciones de As en el agua subterránea por debajo de 0.01 ppm; mientras que en el 11.7 % (125 sitios de monitoreo) las concentraciones de As estaban en un rango de 0.01 ppm a 0.025 ppm. Por último, en 11.9 % de los sitios de

monitoreo (127), el agua subterránea como fuente de abastecimiento para consumo humano se consideró no apta, puesto que las concentraciones excedieron los 0.025 ppm (Figura 2) (Munguía-Lara et al., 2023).

La Secretaría de Salud en México (SSA) por medio de Norma Oficial Mexicana-127-SSA1-2021, ha establecido el límite permisible de 0.025 ppm de As en el agua para uso y consumo humano, no obstante este límite deberá disminuir gradualmente a 0.01 ppm en 2024 para aquellas localidades con una población mayor a 500,000 habitantes, en 2026 para poblaciones entre 50,000 y 499,000 habitantes y en 2029 para localidades con una población menor a 50,000 habitantes.

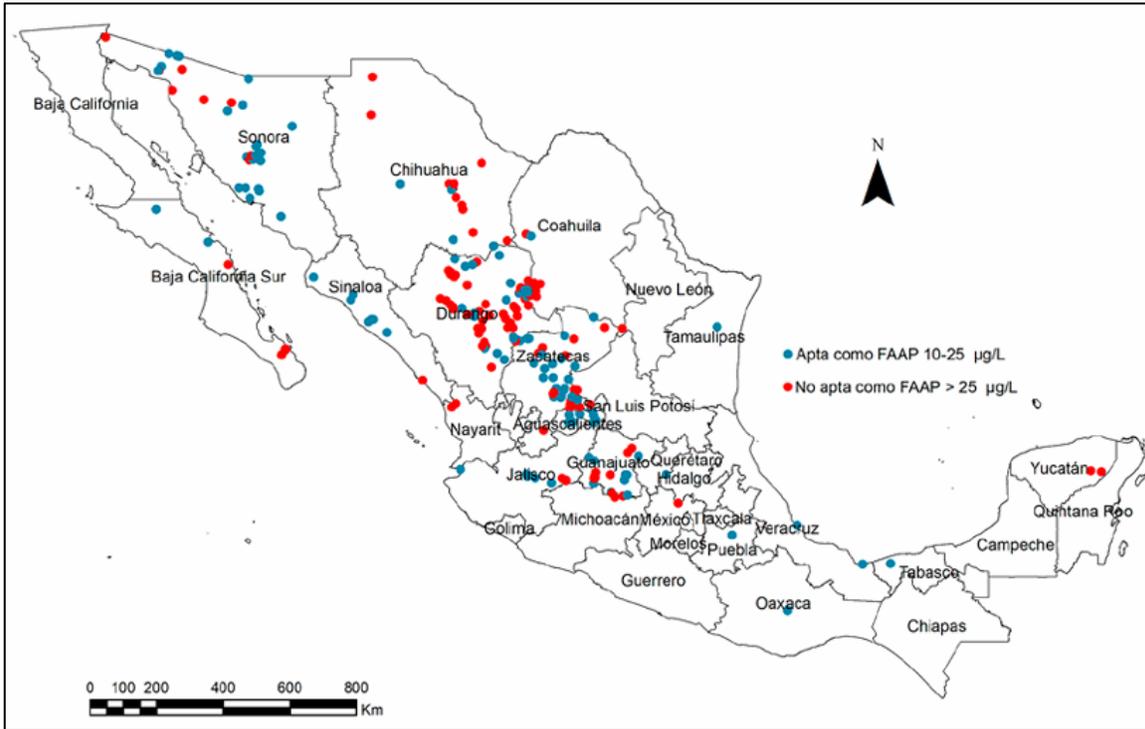


Figura 2. Ubicación de fuentes de abastecimiento de agua potable (FAAP) en México aptas con concentraciones de As (entre 0.01 ppm y 0.025 ppm; mostradas en color azul) y no aptas (> 0.025ppm; mostradas en color rojo). Obtenida de Munguía-Lara et al. (2023).

Para el caso del estado de Guanajuato se ha hecho evidente la contaminación del agua subterránea por As en varias ciudades, en donde se exceden los LMP establecidos por la Norma Mexicana (Coreño-Alonso et al., 2023). Investigaciones desarrolladas en Salamanca, una importante ciudad industrial de esa zona, reportaron contenidos de As superiores a la norma para agua potable en la mayoría de los pozos urbanos (Bundschuh et al., 2008). Por otro lado un estudio realizado en la Cuenca de la Independencia (CI), con un área de 7,000 km<sup>2</sup>, ubicada al noreste del estado de Guanajuato, determinó que 500 km<sup>2</sup> de la CI no cumplían con el LMP de la NOM-127-SSA1-2021 y cerca de 4,000 km<sup>2</sup> no alcanzaban el LMP que sugiere la OMS (Ortega, 2009).

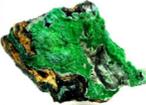
Entendiendo que el agua potable es un recurso indispensable para el desarrollo de los países y la mejora en la calidad de vida de las poblaciones, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), ha declarado un derecho humano el acceso al agua potable segura, saneamiento e higiene (Naciones Unidas, 2020)., La ONU, a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 3 “Salud y Bienestar”, el ODS 6 “Agua limpia y saneamiento” y el ODS 10 “Reducción de las desigualdades”, ha trabajado arduamente para establecer metas y estrategias para cumplir dicho derecho, y a su vez ha impactado positivamente en temas relacionados con la salud de las personas y la reducción de la pobreza, además de garantizar la seguridad alimentaria, la paz, los ecosistemas y la educación.

## Generalidades del Arsénico y fuentes de procedencia

El As es un elemento que de acuerdo con su posición en la tabla periódica se clasifica como un metaloide (semiconductor de calor y electricidad) con número atómico 33 y peso atómico 74.92, teniendo cuatro estados de oxidación: arseniato As (V), arsenito As (III), arsénico elemental As (0) y arseniuro As (-III) (Rangel Montoya et al., 2015). El As que se encuentra en la naturaleza es en gran parte pentavalente, el cual es menos tóxico comparándolo con el arsenito. La combinación del As con otros compuestos químicos altera su toxicidad según la solubilidad del compuesto y según la valencia del As en él. Estos se pueden clasificar en tres grupos: compuestos arsenicales inorgánicos (As unido con átomos de otros compuestos que no son carbono), compuestos arsenicales orgánicos (As unido con átomos de carbono por medio de uniones covalentes) y la arsina (As unido con átomos de hidrógeno) que es un gas extremadamente tóxico (Galvão y Corey, 1987; Medina-Pizzali et al., 2018).

En la biósfera, la litósfera, la atmósfera y la hidrósfera, el As se encuentra distribuido de manera natural en su forma orgánica e inorgánica, siendo la inorgánica la más tóxica (Cordero Luna y Martínez Rosales, 2017). Este elemento, proviene en gran parte de la meteorización del material parental; sin embargo, los aportes de mayor relevancia resultan de las erupciones volcánicas, debido a que este suceso tiene como resultado la formación de rocas ígneas (con concentraciones de As inferiores a 5 ppm). Estas rocas se forman por el enfriamiento y la solidificación del magma, proveniente del interior de la Tierra (Orozco-Centeno et al., 2014). Además el vulcanismo genera cenizas volcánicas que pueden liberar cantidades elevadas de As (Bundschuh et al., 2008), provocando que el As llegue a la atmósfera y precipite en la superficie terrestre, aportando As en el suelo, las aguas superficiales y las subterráneas (Smedley y Kinniburgh, 2002). Los numerosos casos de presencia de As en el agua subterránea en el mundo están relacionados con ambientes geológicos diferentes: formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, sistemas hidrotermales, cuencas aluviales Terciarias y Cuaternarias. Sin embargo, los minerales de sulfuro (oxidación de la arsenopirita) son una de las fuentes naturales más importantes de aportación de As a los acuíferos y el suelo (Bundschuh et al., 2008). En la Tabla 1 se indican los principales minerales de As en la naturaleza.

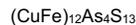
**Tabla 1.** Principales minerales de arsénico. Obtenida de Bundschuh et al. (2008) y <https://mineral-s.com>.

Nombre y Composición	Mineral
Arsenopirita  FeAsS	
Conicalcita  CaCu(AsO <sub>4</sub> )(OH)	
Annabergita  (NiCO) <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	
Escorodita  FeAsO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	

Oropimente



Tennantita



Asimismo, las actividades antropogénicas han contribuido de manera significativa a la distribución del As, contaminando el suelo, el aire y los cuerpos de agua superficiales y subterráneas. La contaminación puede ser muy acusada en el caso de explotaciones mineras, donde tienen lugar procesos de oxidación de sulfuros como la pirita (que provoca la movilización del As) (Bundschuh et al., 2008). Sin embargo, diversas industrias contribuyen a la distribución de este contaminante haciendo y usando productos a base de As, por ejemplo: para la fabricación de vidrio, la fabricación de conservantes de madera, en sectores de aleaciones no ferrosas y productos electrónicos, la fabricación de productos químicos agrícolas para controlar plagas (pesticidas) (Chen et al., 2016), la fabricación de medicamentos (Zambrano Cárdenas et al., 2011), entre otros. Sumando a esto, los desechos industriales son una fuente más de contaminación.

## Técnicas para la remoción del Arsénico en el agua

En respuesta a la problemática de las altas concentraciones de As en el agua, se han desarrollado diversas técnicas para la remoción de este contaminante. A continuación, se describen las técnicas más relevantes.

### Coagulación – floculación

Es un proceso en el cual se emplean agentes químicos que promueven la desestabilización de las partículas coloidales que se encuentran suspendidas en el agua, provocando la formación de aglomerados (Acosta Bastar, 2021). En el método de coagulación, los iones de carga positiva de los coagulantes (por ejemplo, sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  o cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$ ) neutralizan o reducen la carga negativa de los coloides, provocando así la coagulación de las partículas. Por otro lado, en la floculación, la adición de un floculante aniónico provoca la neutralización de la carga entre las partículas más grandes formadas, que finalmente se convierten en grandes flóculos, los cuales pueden ser removidos mediante la sedimentación por efecto de la gravedad, por precipitación o por filtración (Mohindru et al., 2017).

Entre los factores de importancia para la remediación con este método se han identificado el tipo y la dosis del coagulante, estado de oxidación y concentración de arsénico inicial, temperatura, presencia de otros solutos inorgánicos y el pH (Franco y Carro Pérez, 2014)

Cuando es utilizado el sulfato de aluminio, el As se elimina mediante el método de precipitación-coprecipitación. El intervalo de pH óptimo para la máxima eliminación de arseniato es de 6-8. En concentraciones iniciales bajas de As (V), la mayor eficiencia de eliminación de As (V) se obtiene con dosis altas de sulfato de aluminio, mientras que, en concentraciones iniciales altas de As (V), la mayor eficiencia de eliminación de As (V) se obtiene con dosis bajas del coagulante. Por otro lado, la remoción de As (III y V) mediante el coagulante cloruro férrico tiene cierto efecto de la materia orgánica y se ha descubierto que la materia orgánica mejora la coagulación sólo del As(V). También, la tasa de precipitación aumenta con el aumento de la temperatura y el aumento de la presión de  $\text{O}_2$ ; sin embargo, la presencia de fosfato y silicato reduce la velocidad de precipitación de los hidróxidos férricos. En presencia de calcita gruesa, los pequeños coagulos con As recubiertos sobre superficies de calcita gruesa, aumentan la velocidad de sedimentación de los coagulos en una medida considerable. Esta coagulación mejorada, seguida de una filtración convencional, consigue una eliminación muy elevada de As (más del 99 %) a partir de agua con alto contenido en As (concentración de 5 ppm) (Basu et al., 2014).

Entre las desventajas de usar esta técnica se encuentra: que es costoso en la inversión, se requiere un proceso de filtración y, por último, la producción de lodos contaminados con As (Pezeshki, 2023).

### Membranas – Osmosis inversa

Un proceso por membranas es la ultrafiltración, esta al estar mejorada con micelas de tensoactivos catiónicos dan como resultado altos porcentajes de remoción de As, por ejemplo, utilizando cloruro de cetilpiridinio se obtiene 96 % de remoción y utilizando bromuro de hexadeciltrimetilamonio se obtiene un 94 % de remoción (Basu et al., 2014).

Otra de las técnicas de membrana utilizadas en la purificación del agua es la nanofiltración, pueden tener diversas formas, como espiral, lámina, tubo y fibra. Se emplea para eliminar iones de dureza del agua como el calcio y el magnesio, compuestos orgánicos, virus, bacterias y pesticidas. Para extraer metales pesados de soluciones inorgánicas, este procedimiento tiene una eficacia extremadamente excelente. Además, ofrece la reducción de los gastos de consumo y gastos energéticos. Entre sus inconvenientes se encuentra la reducción del rendimiento del proceso en caso de aumento de las concentraciones de contaminantes y el bloqueo del filtro causado por los sedimentos formados por iones y coloides (Pezeshki, 2023).

La ósmosis inversa es una técnica de desmineralización o desalinización, utilizada para separar los solutos (como iones disueltos y sustancias orgánica) en solución de los solventes (agua). La ósmosis inversa se basa en una membrana semipermeable que se encarga de la separación. La membrana deja pasar el agua y retiene la mayor parte de los sólidos disueltos. La fuerza motriz de la ósmosis inversa es una presión aplicada que empuja el agua a través de la membrana en dirección opuesta a la del proceso natural de ósmosis, de un compartimento concentrado a un compartimento más diluido (Kucera, 2023). La remoción de As por ósmosis inversa depende de varios factores, como el pH, la presión, el caudal de alimentación, la concentración inicial de As, etc (Akin et al., 2011). Los inconvenientes incluyen la obstrucción de las membranas, la necesidad de sustituir las y un aumento de los gastos de explotación, todo lo cual puede evitarse utilizando un procedimiento adecuado de pretratamiento (Pezeshki, 2023).

### Intercambio iónico

Se describe como un proceso físico-químico por el que un anión en la fase de resina sólida se intercambia por un ion en el agua de alimentación. La eficacia del proceso se mejora mediante la oxidación previa de As (III) a As (V), ya que, el As (V) puede removerse fácilmente mediante el uso de una resina de intercambio aniónico de base fuerte, ya sea en forma de cloruro o de hidróxido. Por otro lado, la remoción de As (V) depende en gran medida del pH de la solución y de la concentración de iones competidores, especialmente sulfatos y nitratos, del tipo de resina y de la alcalinidad del agua. Además, el rendimiento puede verse afectado negativamente por altos niveles de sólidos totales disueltos. Entre las desventajas que tiene este proceso es la generación de productos químicos peligrosos durante la regeneración de la resina, es ineficaz para la remoción de As (III) y, además, tiene un costo elevado (Zakhar, 2018).

### Adsorción

Es una técnica que se caracteriza por el uso de diversos productos adsorbentes comerciales o materiales autóctonos empaquetados en columnas de lecho fijo (Litter, 2018). Es utilizada por su alta eficacia de remoción de As, su fácil manejo, su bajo costo y la ausencia de lodos. (Pezeshki, 2023).

Uno de los materiales adsorbentes que son utilizados en esta técnica, es el carbón activado. El As pentavalente se adsorbe en el carbón activado granular. El pretratamiento del carbón con soluciones de Cobre (II) mejora su capacidad de remoción del As. El pH óptimo para la adsorción de As por el carbón pretratado es aproximadamente de 6. De igual forma, los carbones activados impregnados de hierro son muy eficaces en la remoción del As. El As (V) y el As (III) se adsorben en la superficie del oxihidróxido de hierro. El aumento de la impregnación de hierro, por precipitación o evaporación de sales de hierro, incrementa los volúmenes del lecho, lo que aumenta el poder adsorbente. También se aumenta el contenido de hierro en el carbón activado por el método de hidrólisis forzada con cloruro férrico (Basu et al., 2014).

Entre los adsorbentes a base de aluminio se encuentran la alúmina activada. Esta se prepara mediante deshidratación térmica de hidróxido de aluminio. La eficiencia en la adsorción de As está vinculada al pH. Para la adsorción de As (V) se necesita un pH de 6 y 8, mientras que, para el As (III) es necesario un pH de 7.6 (Verma et al., 2014).

Se utilizan iones fosfato de hierro (III) amorfo o cristalino, debido a la eficiencia en remover el As (III). La oxidación del As (III) por el Hierro (III) y la sustitución del fosfato por el As(V) se producen durante la adsorción del As. (Basu et al., 2014).

La biosorción (o bioadsorción) es una inmovilización pasiva de metales por la biomasa (algas, hongos y bacterias). Es un proceso que se basa en interacciones fisicoquímicas entre el metal y los grupos funcionales de la pared celular. La pared celular del microorganismo se compone principalmente de polisacáridos, lípidos y proteínas, que permiten la unión de los metales (Mohan y Pittman, 2007). La biomasa fúngica recubierta de óxido de hierro (*Aspergillus niger*) es eficaz para eliminar As de una solución acuosa, elimina eficazmente el 75 % de As (III) y el 95 % de As (V), a un pH de 6 (Basu et al., 2014).

## Uso de geomateriales para la remediación de aguas

Aunque actualmente se tienen diversas técnicas para la remoción de As del agua potable, los altos costos de operación y mantenimiento ha representado una limitación en la implementación de dichas tecnologías (Coreño-Alonso et al., 2023). Esto teniendo en cuenta que la remoción de As del agua potable es un reto recurrente, especialmente en los países con economías emergentes.

En los últimos años la adsorción ha tomado importancia como una técnica sencilla y económica para la remediación del agua contaminada con As, debido a la flexibilidad en el diseño, la reversibilidad del proceso y la posibilidad de regenerar el adsorbente empleado (Carbonel, 2018). Particularmente, la adsorción con adsorbentes naturales usando geomateriales, se ha convertido en una opción atractiva, ya que estos recursos representan un bajo costo si están disponibles y accesibles para la población local. Esto los ha catalogado como una solución emergente para poblaciones de escasos recursos (Acuña-Piedra et al., 2016).

Pese a que la puesta en práctica de esta técnica, así como su sostenimiento son de bajo costo, la adsorción con geomateriales para remover As presenta algunas desventajas relacionadas con el tipo de material utilizado, el pH y las características del agua a tratar. No obstante, la capacidad de ser utilizados en sistemas comunitarios, así como su operación y mantenimiento más sencillos en comparación con otras técnicas, son algunas de las ventajas que han motivado a investigadores a utilizar este tipo de adsorbentes para purificar aguas contaminadas con As (Ortuño-Sánchez, 2019).

Flores et al. (2009) demostró que la roca caliza (i.e. caliza Soyatal), localizada en la región de Zimapán Hidalgo, México, presentaba propiedades idóneas para la adsorción de As, reduciendo considerablemente las concentraciones de dicho metaloide en el agua. Con los resultados obtenidos se registró una eficiencia de remoción de As del 96.5 % (desde 0.456 ppm hasta 0.016 ppm) cuando se trabajó con 10 g de roca disueltos en 100 mL de agua.

Juárez-Aparicio et al. (2024) evaluó la capacidad de la roca caliza de la zona sur de la Sierra de Guanajuato en México para eliminar As del agua subterránea. La muestra de roca que contenía el mayor contenido de  $\text{CaCO}_3$  y el tamaño de grano más pequeño (< 0.05 mm) removió las mayores concentraciones de As, teniendo el rango de eficiencia de remoción más efectivo (94.71 % - 95.39 %), logrando así una concentración de As por debajo del límite permisible establecido en la norma mexicana.

Por otro lado, diversos investigadores han reconocido a las zeolitas como materiales adsorbentes para remover el As de soluciones acuosas. Mejía (2008) utilizó zeolita natural (chabazita) pretratada con óxido de magnesio para remover As de agua para consumo humano; los resultados obtenidos demostraron eficiencias superiores al 90 % de As adsorbido, atribuyendo dichos porcentajes a la utilización de óxido de magnesio (González-Chávez et al, 2023).

Para conocer la eficiencia de la remoción del As en agua que presentan las zeolitas naturales del norte y centro de México, se llevaron a cabo diferentes pruebas con zeolita natural proveniente de los municipios de

Aldama, Chihuahua (MACH) y en San Felipe, Guanajuato (MSF). La zeolita MSF presentó un valor promedio de 51.18 % de remoción, en tanto que MACH de 49.01 %, lo que demostró que el material que presenta mayor remoción de As en agua es el del estado del centro de México (Sujo y Villalba, 2023).

Juárez-Aparicio et al. (2024) evaluaron la eficiencia del caolín como adsorbentes para As. La muestra de caolín (compuesta principalmente de caolinita y cuarzo) se obtuvo de Comonfort, Guanajuato. Se realizaron experimentos utilizando reactivo piraña y ácido trimésico para estudiar sus efectos en la capacidad de adsorción. Con los resultados se observó una capacidad de adsorción de As por medio del caolín del 25 % utilizando ácido trimésico y con el reactivo piraña aumentó hasta 68 %.

Finalmente, Rehman et al. (2022) comparó la laterita y la caolinita como adsorbentes de As. Se encontró que la laterita y la caolinita eran adsorbentes efectivos para la eliminación de As. Sin embargo, la laterita mostró una adsorción de As superior en comparación con la caolinita, lo cual se relacionó a una mayor cantidad de óxidos de hierro y aluminio en las lateritas.

## Conclusiones

En el presente artículo de divulgación se abordaron las generalidades que tiene el As, su presencia en cuerpos de agua y su distribución en diversas partes del mundo. Resaltando que esta problemática ambiental ha estado presente de manera natural, sin embargo, los aportes antropogénicos derivados del desarrollo de la sociedad han contribuido a que sea un problema mayor, es decir, que se encuentran concentraciones superiores a lo establecido en las normas nacionales o que el As se encuentre distribuido en zonas donde no se encontraba naturalmente. Este hecho, ha propiciado la búsqueda de alternativas para la remoción del contaminante. No obstante, estas técnicas en diversas ocasiones no pueden resultar viables debido a la carencia de infraestructura y a su costo muy alto. En México y en países con economías emergentes, se requieren de propuestas y soluciones sostenibles que estén acordes a los recursos materiales y económicos de poblaciones que no cuentan con la infraestructura adecuada para implementar estas tecnologías y que, a su vez, necesiten de una mayor inversión respecto a su operación y mantenimiento. Debido a esto, la técnica de adsorción mediante el uso de geomateriales es una opción prometedora por su bajo costo y fácil acceso en zonas vulnerables al agua contaminada por As. Es por ello que, diversos autores han ido identificando y estudiando distintos tipos de geomateriales para evaluar su capacidad de adsorción. Asimismo, mediante esta metodología, el objetivo principal es garantizar el derecho al agua potable para salvaguardar la salud de la población.

## Bibliografía

- Acosta Bastar, A. L. (2021). Análisis de Dinámica de Fluidos Computacional del Proceso de Coagulación-Floculación empleando Almidones de Malanga (*Colocasia esculenta*) como Agentes Floculantes.
- Acuña-Piedra, A., Araya-Obando, A., Romero-Esquivel, L. (2016). Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29 (3), 23-34.
- Akin, I., Arslan, G., Tor, A., Cengeloglu, Y., Ersoz, M. (2011). Removal of arsenate [As (V)] and arsenite [As (III)] from water by SWHR and BW-30 reverse osmosis. *Desalination*, 281, 88-92.
- Basu, A., Saha, D., Saha, R., Ghosh, T., Saha, B. (2014). A review on sources, toxicity and remediation technologies for removing arsenic from drinking water. *Research on Chemical Intermediates*, 40, 447-485.
- Bundschuh, J., Armienta, M. A., Morales-Simfors, N., Alam, M. A., López, D. L., Delgado Quezada, V., Ahmad, A. (2020). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(16), 1727-1865.
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A., Litter, M. (2008). Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. Editado por CYTED Impreso en Argentina.
- Carbonel, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética Ingeniería, 23 (3), 252-273.

- Chen, W. Q., Shi, Y. L., Wu, S. L., Zhu, Y. G. (2016). Anthropogenic arsenic cycles: a research framework and features. *Journal of Cleaner Production*, 139, 328-336.
- Cordero, C. L., Martínez, J. M. (2017). Síntesis y caracterización de materiales adsorbentes para remover arsénico de agua de pozos en Guanajuato. *Jóvenes en la Ciencia*, 3(2), 576–580.
- Coreño-Alonso, O., González, L., Coreño-Alonso, J. (2023). Assessment of two low-cost geological materials as adsorbents for arsenic. *Tecnología y ciencias del agua*, 14 (2), 216-299.
- Cortés, F., Chávez-Guillén, R., Soto, P., Smedley, P. L. (2012). An overview of arsenic occurrence in the groundwater of Mexico: Proceedings of the 4th International Congress on Arsenic in the Environment, 2012.
- Flores, E., Armienta, A., Micete, S., Valladares, M. R. (2009). Tratamiento de Agua para Consumo Humano con Alto Contenido de Arsénico: Estudio de un Caso en Zimapán Hidalgo-México. *Información tecnológica*, 20(4), 85-93.
- Franco, M. F., Carro, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 177-190.
- Galvão, L. A. C., Corey, G. (1987). Arsénico. *Serie Vigilancia*, 3.
- González-Chávez, J. L., Chiken, A., Martín, F., Ceniceros-Gómez, A. E. (2023). Elucidación del mecanismo de remoción de arsénico en disolución acuosa con residuos metalúrgicos. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 39, 25-42.
- Joseph, L., Jun, B. M., Flora, J., Park, C. M., Yoon, Y. (2019). Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*, 229, 142-159.
- Juárez-Aparicio, F., Morales, I., Hernández, M. (2024). Simultaneous removal of fluoride and arsenic from drinking groundwater using limestones from Bajío Guanajuatense, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 17, 1-22.
- Kucera, J. (2023). Reverse osmosis. John Wiley & Sons.
- Litter, M. (2018). Arsénico en agua. En: Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros). Buenos Aires: UNSAM Edita.
- Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de medicina experimental y salud pública*, 35, 93-102.
- Mejía, F. A. (2008). Adsorción de arsénico en zeolita natural (chabazita) pretratada [Tesis de maestría, Universidad de Sonora]. Repositorio Institucional UNISON.
- Munguía-Lara, A., Hernández, L., Martínez, N. (2023). Arsénico en el agua potable en México. *Elementos* 129, 19-23.
- Mindat.org (2017). Annabergite [Fotografía]. Obtenido de: <https://www.mindat.org/min-240.html>
- Minerales de colección s.l. (2020). Arsenopirita [Fotografía]. Obtenido de: <https://mineral-s.com/arsenopirita>
- Minerales de colección s.l. (2020). Conicalcita [Fotografía]. Obtenido de: <https://mineral-s.com/conicalcita>
- Minerales de colección s.l. (2020). Ecorodita [Fotografía]. Obtenido de: <https://mineral-s.com/escorodita>
- Minerales de colección s.l. (2020). Oropimente [Fotografía]. Obtenido de: <https://mineral-s.com/oropimente>
- Minerales de colección s.l. (2020). Tennantita [Fotografía]. Obtenido de: <https://mineral-s.com/tenantita>
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—a critical review. *Journal of hazardous materials*, 142(1-2), 1-53.
- Mohindru, J. J., Garg, U. K., Gupta, R. (2017). Coagulation-flocculation technologies for arsenic removal-A review. *Asian Journal of Research in Chemistry*, 10(3), 405-413.
- Naciones Unidas. (2020). Objetivos y metas de Desarrollo Sostenible. Obtenido de *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible (un.org)*

- Organización Mundial de la Salud. (2022). Arsénico. Obtenido de Arsénico (who.int)
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidro geoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(1), 143-161.
- Orozco-Centeno, W. P., Branch, J. W., Jiménez-Builes, J. A. (2014). Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (36), 5-9.
- Ortuño-Sánchez, M. (2019). Estudios sobre la eliminación de arsénico, selenio y antimonio de efluentes líquidos mediante el uso de materiales de bajo coste [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid].
- Pezeshki, H., Hashemi, M., Rajabi, S. (2023). Removal of arsenic as a potentially toxic element from drinking water by filtration: a mini review of nanofiltration and reverse osmosis techniques. *Heliyon*, 9(3).
- Rangel, E. A., Montañez, L. E., Luévanos, M. P., Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.
- Rehman, A., Rukh, S., Ayoubi, S. A., Khattak, S. A., Mehmood, A., Ali, L., Khan, A., Malik, K. M., Qayyum, A., Salam H. (2022). Natural Clay Minerals as Potential Arsenic Sorbents from Contaminated Groundwater: Equilibrium and Kinetic Studies. *Int J Environ Res Public Health*, 19(23).
- Secretaría de Salud. (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de DOF - Diario Oficial de la Federación
- Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), 517-568.
- Sujo, L., Villalba, L. (2023). Remoción de arsénico en agua con zeolitas naturales provenientes del norte y centro de México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 17(3).
- Verma, P., Agarwal, A., Singh, V. K. (2014). Arsenic removal from water through adsorption-A Review. *Recent res sci technol*, 6(1), 541.
- Zakhar, R., Derco, J., Čácho, F. (2018). An overview of main arsenic removal technologies. *Acta Chimica Slovaca*, 11(2), 107-113.
- Zambrano, R. O., González, L. I., Arangure, F. J., Espinosa, M. A., Paredes, J. C. (2011). ¿Arsénico en Nayarit? *Revista Fuente Año*, 3(6).