



GOBIERNO DE  
**MÉXICO**



CONAHCYT  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



Determinar la capacidad bioadsorbente del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para la remoción de arsénico en el agua

Por:

**Paula Alejandra Gómez Palomo**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título del:

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

Torreón, Coahuila, México  
Diciembre 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Determinar la capacidad bioadsorbente del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para la  
remoción de arsénico en el agua

Por:

**Paula Alejandra Gómez Palomo**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título del:

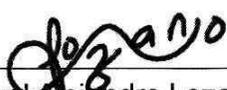
**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

Tesis que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito  
parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

  
\_\_\_\_\_  
PhD. Vicente de Paul Álvarez Reyna

Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Samuel Alejandro Lozano Morales

Vocal

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Edgardo Cervantes Álvarez  
Vocal

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Ricardo Israel Ramírez Godtfried  
Vocal Suplente

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Isabel Márquez Mendoza  
Coordinador de la División de Carrera Agronómicas



Torreón, Coahuila, México  
Diciembre 2023



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONAHCYT  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Determinar la capacidad bioadsorbente del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para la  
remoción de arsénico en el agua

Por:

**Paula Alejandra Gómez Palomo**

TESIS

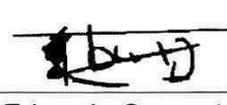
Presentada como requisito parcial para obtener el título del:

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
PhD. Vicente de Paul Álvarez Reyna  
Asesor principal interno

  
Dr. Samuel Alejandro Lozano Morales  
Asesor principal externo

  
M.C. Edgardo Cervantes Álvarez  
Coasesor

  
Dr. Ricardo Israel Ramírez Godtfried  
Coasesor

  
Dr. José Isabel Márquez Mendoza  
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México  
Diciembre 2023

## **AGRADECIMIENTOS**

PhD. Vicente de Paul Álvarez Reyna, por ser director de la presente tesis de pregrado, brindándome herramientas y conocimientos de calidad personal y profesional.

Dr. Alejandro Lozano, a quien le agradezco por aceptar ser el asesor principal externo; por sus consejos y dedicación que me brindo durante todo este periodo.

Dr. Raúl Herrera Mendoza, por ayudarme en los análisis de la fase experimental de la tesis.

Dr. Miguel Medrano Santillana, Dr. Isaías López Hernández, Dra. Natalia Ortega Morales, con quienes estoy muy agradecida por sus apoyos invaluable y por impulsarme a seguir en la investigación.

Dr. José Luis Reyes Carillo, por todas las enseñanzas y habilidades que me ayudaron a forjarme como profesionista.

M.E. Víctor Martínez Cueto, a quien expreso mi más profundo agradecimiento por su contante apoyo en mi desarrollo académico.

**A mi alma mater**, por abrirme sus puertas del conocimiento a lo largo de mi carrera profesional, otorgándome una educación de calidad y momentos únicos que llevaré toda la vida.

## DEDICATORIAS

A mis padres Yolanda Patricia Palomo Rivera y Paris Armando Gómez Caballero, por ser mis guías para cumplir mis sueños en mi etapa personal y profesional, así como mi motivación a seguir brillando, por sus enseñanzas y ser mi motor de mi día con día, por ello y más les dedico cada uno de mis logros.

Por otra parte, a mis hermanas Diana Laura Gómez Palomo y Ana Karen Gómez Palomo, por brindarme su apoyo incondicional, esperando ser una inspiración para ustedes, no dejen de creer ni atreverse, porque son las pintoras de su propio destino. Brillen en donde estén.

Para mi abuela, Yolanda Rivera Ramírez, mi sostén para no rendirme e impulsarme a explorar aquellos senderos que me faltan por descubrir.

También se la dedico hasta el cielo a mi abuelo PhD. Arturo Palomo, por instruirme que la mejor herencia que alguien puede dejarte es la educación.

A mi amiga Karen Alonso Salazar, por acompañarme en cada proceso de mi formación, ser mi confidente y compañera de aventuras.

Y finalmente a mis amigos, Francisco Valero, Lizeth Altunar, Primitivo Altunar, Margarita Galarza y Yubilen García, por ser mi segunda familia, brindándome su apoyo incondicional y sincero.

## RESUMEN

El “rey de los venenos” comúnmente conocido como el metaloide más abundante en la corteza terrestre “arsénico” es considerado el más cancerígeno en su forma inorgánica. La contaminación de agua por niveles elevados de arsénico ha desencadenado problema sanitario en todo el mundo. Se reconoció que la región Lagunera es una zona de Hidroarsenicismo Crónico Endémico, causando la enfermedad de los pies negros. El nopal es una cactácea que prolifera en los climas áridos y semiáridos, su ingrediente activo conocido como “mucilago” se ha hecho atractivo para su uso como coagulante en el tratamiento de aguas. El objetivo de la presente tesis de pregrado es determinar la capacidad del nopal *O. ficus-indica* (L.) Mill. como bioadsorbente para la remoción de arsénico en el agua. En la elaboración de la harina de nopal, se recolectaron y secaron los cladodios de nopal, posteriormente se realizó un análisis de caracterización de humedad, materia orgánica y cenizas, aplicando métodos gravimétricos. Para esta investigación se evaluaron dos pruebas para la remoción, el primero de mezcla directa de la solución sintética de arsénico de 100 mg/L con una cantidad de 200 g de harina de nopal y se le agregó agua destilada y 10 ml de solución de 100 mg/L de As. Se puso en agitación magnética por tres días. El segundo fue por tratamiento de columna de 100 mL de una solución de 100 ppm de arsénico. Finalmente se analizó el % de remoción de arsénico mediante la técnica de ICP.

**Palabras clave:** Adsorbente, Remoción, Nopal, Arsénico, Agua

## ABSTRACT

The "king of poisons" commonly known as the most abundant metalloid in the earth's crust "arsenic" is considered the most carcinogenic in its inorganic form. Water contamination by high levels of arsenic has triggered health problems worldwide. The Lagunera region has been recognized as a zone of Endemic Chronic Hydroarsenicism, causing the black feet disease. The nopal is a cactus that proliferates in arid and semi-arid climates, its active ingredient known as "mucilage" has become attractive for its use as a coagulant in water treatment. The objective of the present undergraduate thesis is to determine the capacity of the nopal *O. ficus-indica* (L.) Mill. as a bioadsorbent for the removal of arsenic from water. In the elaboration of nopal flour, nopal cladodes were collected and dried, then a characterization analysis of moisture, organic matter and ash was performed, applying gravimetric methods. For this research, two removal tests were evaluated, the first one of direct mixing of the synthetic arsenic solution of 100 mg/L with an amount of 200 g of nopal flour and added distilled water and 10 ml of a solution of 100 mg/L of As. It was placed in magnetic agitation for three days. The second was by column treatment of 100 mL of a 100 ppm solution of arsenic. Finally, the % removal of arsenic was analyzed by ICP technique.

**Keywords:** Adsorbent, Removal, Nopal, Arsenic, Water

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
2.1. General: .....	4
2.2. Específicos: .....	4
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. Contaminación Hídrica</b> .....	<b>5</b>
3.1.1. Contaminación por arsénico.....	5
3.1.3. Fuentes de exposición del arsénico.....	6
2.1.3. Toxicidad del arsénico .....	6
2.1.4. Hidroarsenismo Crónico Regional Endémico (HACRE) .....	7
<b>2.2. El agua en México</b> .....	<b>8</b>
2.2.1. Ubicación geográfica.....	8
2.2.2. Problemática del agua .....	8
<b>2.3. El agua en la comarca lagunera</b> .....	<b>9</b>
2.3.1. Ubicación geográfica.....	10
2.3.2. Hidroarsenismo en la comarca lagunera.....	10
2.4. Tratamientos de aguas contaminadas con arsénico (As) .....	11
2.5.1. Taxonomía .....	13
2.5.2. Nopal como adsorbente .....	14
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	<b>21</b>
<b>5. CONCLUSIÓN</b> .....	<b>24</b>
<b>6. LITERATURA CITADA</b> .....	<b>25</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonomía de la <i>Opuntia ficus-indica</i> , según Bravo-Hollis (1978).....	14
Cuadro 2 .Resultados de la caracterización de la harina de nopal.....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones hidrológico-administrativas y zonas de disponibilidad. Fuente: López-Morales, 2017.....	9
Figura 2. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad Laguna.....	17
Figura 3. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila .....	18
Figura 4. Nopal después de 3 días en el sol .....	18
Figura 5. Resultado del nopal después de la estufa.....	18
Figura 6. Solución final con tratamiento de columna .....	22
Figura 7. Harina de nopal después del tratamiento de columna.....	22

## 1. INTRODUCCIÓN

El medio ambiente es el entorno físico (no vivo y vivo) de la sociedad humana. La conexión entre los ecosistemas medioambientales y sociedad son importante, ya que sus acciones recaen sobre el desarrollo sostenible del planeta (Grijalva-Endara *et al.*, 2020).

Una vez adentrada una concepción básica de medio ambiente, en su acepción *sui generis*, es de mencionarse que Kılıç (2020), nos recalca que el agua es esencial para la vida porque influye en salud pública y nivel de vida. Sin embargo, el agua está desigualmente distribuida en todo el mundo. No obstante, se sabe que es un recurso natural muy importante para mantener las actividades vitales del ser humano, como la nutrición, respiración, circulación, excreción y reproducción. Además, de ser una sustancia básica en la formación de entorno vital. Por lo tanto, también existen efectos negativos como lo son el aumento de la población mundial, las repercusiones del cambio climático y las variaciones en el estilo de vida, ya que ejercen una presión cada vez mayor sobre nuestros recursos; lo que provoca un estrés hídrico. Por ello, cada vez se es más consciente de la urgente necesidad de conservar el agua.

La contaminación de agua tiene un gran auge, ya que influye y afecta directamente en la salud del hombre, de la flora, fauna y del ecosistema (Baquerizo-Cabrera *et al.*, 2019). Fonseca-Sánchez *et al.* (2019) nos alude, que la polución de mantos freáticos no es un problema que pueda resolverse en un plazo corto, desencadenando más problemáticas que podrían tomar décadas en encontrar una solución; por ello, recae la importancia de diseñar y realizar programas de educación que eviten o minimicen la contaminación. Bajo este contexto, el conocer las principales amenazas que afectan la calidad del agua es de suma importancia, dando una posibilidad de resolver los principales problemas que alteran cualidades del agua, brindando una mayor seguridad sanitaria y sobre todo poder implementar estratégicas que permitan tener a la población agua segura no solo en sectores

privados, sino también en zonas vulnerables donde no tienen acceso a sistemas de tratamiento.

La contaminación por arsénico en el agua potable es una grave preocupación en todo el mundo (Monteiro De Oliveira *et al.*, 2021); es una sustancia presente en forma natural que puede encontrarse en el aire, el agua y el suelo (NCI., 2015). Este metaloide se puede encontrar en 2 formas: a) inorgánico, procede principalmente del medio ambiente, y b) orgánico, se consume principalmente en alimentos (Hong *et al.*, 2017). OMS (2022) señala que el arsénico en su forma inorgánica es muy tóxico.

Wang *et al.* (2023) nos dice, que la mayor parte del agua potable está contaminada con arsénico, debido al ciclo global del arsénico que se origina de diversas fuentes naturales y frecuentes actividades humanas.

En México, la mayor parte de las personas están propensas a los altos niveles de arsénico que se encuentran. Específicamente en 2018 en diferentes estados de la república ya constaban con casos de As en el agua. Solo por mencionar algunos estados con niveles altos, encontramos a: Coahuila, Durango, Sinaloa, Hidalgo, Nuevo León, Yucatán (Espinosa, 2021).

De los estados de México cuya agua está más contaminada por arsénico, es Coahuila, dando un realce a la región Lagunera, siendo la más documentada. Valdés-Perezgasga (2007), nos dice que si se toma como base la Norma Oficial Mexicana, donde se manifiesta que los límites máximos permisibles en aguas contaminadas con arsénico es de 25 mg por litro, sin embargo, en la región lagunera se cuenta con más de 400,000 laguneros expuestos a niveles elevados de intoxicación por este metaloide, pero, si consideramos el límite que marca la OMS (10 mg/L) da como resultado que la mayor parte de los laguneros este sujeta a padecer hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE). La Comarca Lagunera cuenta con 116 pozos en los sistemas municipales, de los cuales 57 de ellos no cumplen con el límite permitido (Canedo, 2023).

Aunque ya existen sistemas de tratamiento de aguas que ayudan a remover el arsénico, sus costes al ser muy elevados lo hacen menos rentable en su instalación en las comunidades rurales. Por ello, surge la necesidad de desarrollar tecnologías de eliminación de As sostenibles y de bajo coste (Alkurdi *et al.*, 2021).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. General:

Determinar la capacidad del nopal *O. ficus-indica* (L.) Mill. como bioadsorbente para la remoción de arsénico en el agua

### 2.2. Específicos:

- Obtener el polvo fino de nopal.
- Evaluar el bioadsorbente en agua preparada con arsénico.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1. Contaminación Hídrica

El agua está presente en la atmosfera, hidrosfera y dentro de nosotros mismo, puesto que constituye a una gran porción en el cuerpo humano. El agua está contaminada cuando existe la presencia de sustancias extrañas y por consecuente deja de estar adaptada para la finalidad a la que está destinada. Hay 3 tipos de contaminantes: 1) biológicos; 2) químicos; c) físicos. En los químicos, se encuentran los hidrocarburos, fenoles, plaguicidas, detergentes, elementos como fósforo y nitrógeno, y metales pesados (Mendoza-Cano, 2017).

En cuanto a los contaminantes biológicos, son los organismos presentes en H<sub>2</sub>O. Así mismo, también están los microbio o contaminantes microbiológicos, entre ellos se pueden encontrar los virus, protozoos y parásitos. Por otra parte, en los físicos, se ven afectados en sus propiedades, como, por ejemplo: sedimentos o materia orgánica suspendida en lagos, ríos y arroyos (EPA, 2022).

##### 3.1.1. Contaminación por arsénico

El arsénico en el agua, tiene diversos efectos asociados en problemas sanitarios en más de 50 países, y por consecuente, esta problemática se está volviendo aún más complicada, puesto que, con el aumento de personas intoxicadas; en consecuencia, a esto, se ha detectado que el agua potable está contaminada con arsénico (Sanyal *et al.*, 2020).

##### 3.1.2. Química del arsénico

Así mismo, también es llamado el "rey de los venenos" (Sanjrani *et al.*, 2019); es el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre, por sus características, es considerado como un metaloide cancerígeno humano con número atómico 33, con sólo un isótopo que tiene una masa atómica de 75 (Ali *et al.*, 2019). Wan *et al.* (2020) nos dice que es un metal pesado, debido a su elevada toxicidad e incapacidad de degradación natural.

El As es tóxico casi insípido e inodoro y se presenta en cuatro estados de valencia comunes: As(o), As(III), As(V) y gas Arsina; así mismo, se encuentra en tres formas comunes: sal inorgánica, sal orgánica y forma gaseosa (Kuivenhoven y Masón, 2022).

### 3.1.3. Fuentes de exposición del arsénico

Es sabido que el arsénico y muchos de sus compuestos o derivados son venenosos; por lo cual, se estima que casi del 97 % de la población está expuesta al arsénico (Ghosh, 2015), y sus vías de ingreso al organismo con: ingestión, inhalación y dérmica (Rodríguez-Heredia, 2017).

El arsénico, se puede encontrar en forma natural en aire, agua y suelo; así mismo, puede liberarse en el medio ambiente por algunos procesos agrícolas e industriales, como la minería y la fundición de metales (NCI., 2015).

La OMS (2022), menciona que el arsénico en su forma inorgánica es muy tóxico, por lo cual, la interacción a elevados niveles puede deberse a múltiples factores como: a) ingesta aguas contaminadas o alimentos; b) riego al sembrado de alimentos, procesos industriales y c) el consumo de tabaco. Sharma *et al.* (2014) afirma que la exposición al As no solamente se manifiesta al beber el agua, sino también al cocinarla; el riego con aguas subterráneas contaminadas con As puede dar lugar a una acumulación gradual en los suelos superficiales y, por tanto, las cosechas tendrán concentraciones altas.

Por otra parte, la norma actual para el nivel máximo de contaminantes (MCL) de arsénico en el agua potable recomendada por la Organización Mundial de la Salud es de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  (Hao *et al.*, 2018).

### 2.1.3. Toxicidad del arsénico

La toxicidad se cuándo un micronutriente o cualquier compuesto tóxico supera su límite máximo permisible. Según la lista "Top 20 Hazardous peligrosas" elaborada por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU. y la Agencia de

Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR) (ATSDR), entre los metales pesados se encuentran el arsénico (As), el plomo (Pb), el mercurio (Hg) y el Cadmio (Cd) (Hammed *et al.*, 2019).

Su ingesta excesiva y prolongada de arsénico inorgánico en los alimentos, y en el agua, está causando arsenicosis, lo que provoca trastornos, discapacidades y enfermedades potencialmente mortales. Se estima que alrededor de 100 millones de personas, mayormente en países emergentes, están expuestos a este riesgo. La situación de la arsenicosis en los países ha sido calificada como la mayor amenaza química para la salud pública y que a su vez, se está extendiendo a regiones en las que el agua de pozo casi estéril. Por lo cual, la intoxicación por arsénico representa un problema sanitario mundial y su toxicidad depende del estado de oxidación (Genchi *et al.*, 2022) y solubilidad.

El hidroarsenicismo se manifiesta cuando hay una exposición crónica al arsénico en los flujos de agua (Olmos y Ridolfi, 2018). Por otra parte, cabe resaltar que este metaloide es cancerígeno por naturaleza, y su exposición induce diversos riesgos para la salud, como arsenicosis, cáncer de piel, pigmentación, efectos neuroconductuales, trastornos intelectuales y entre otras enfermedades crónicas (Soumika y Soma, 2021). Entre las enfermedades que se han relacionado con el envenenamiento por arsénico destacan: la diabetes, hiperqueratosis, hipertensión, neuropatía y neurodegeneración. Hasta la fecha, no existe ningún remedio específico para la intoxicación por arsénico (Olabode-Fatoki y Abiodun-Badmus, 2022).

#### 2.1.4. Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE)

El hidroarsenicismo ha afectado a todo el mundo. Se ha observado y estudiado que esta problemática está afectando la salud de la población.

Bajo este contexto, el Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) es la enfermedad que se desarrolla al tener un contacto prolongado con altos niveles de arsénico (Yanicelli, 2015).

La manifestación de las afecciones por HACRE, comienzan en la piel como leucodermia y/o queratosis palmo-plantar, así como, diversas patologías como diabetes, arteriopatías, aumento de la incidencia de cáncer en órganos internos (esófago, estómago, hígado, colon, pulmón, vejiga, próstata). El problema se presenta en los lugares donde no existen plantas de potabilización adecuadas, para el consumo domiciliario y en zonas rurales con población dispersa (Villaamil-Lepori, 2015).

Por otra parte, García (2011), señala que se han encontrado aguas con arsénico en diferentes países, algunos de ellos son: México, Perú, China y Estados Unidos. Por otro lado, se pueden reconocer cuatro etapas en el desarrollo del HACRE (esquema de Levell y Clarke):

- Período Prepatogénico.
- Periodo Preclínico
- Período Clínico
- Período de Complicaciones

## 2.2. El agua en México

### 2.2.1. Ubicación geográfica

El nombre oficial es Estados Unidos Mexicanos, está circunscrito en la parte meridional de América del Norte, colindando con Estados Unidos al norte del país y en el sureste colinda con Belice y Guatemala; tiene una amplitud territorial de 1,964,375 km<sup>2</sup>, aunado a esto, se le añade la Zona Económica Exclusiva de mar territorial, por lo que la superficie total del país es de 5,114,295 km<sup>2</sup> (SRE, 2013).

### 2.2.2. Problemática del agua

Jiménez-Cisneros *et al.* (2010), nos dice que las principales fuentes de contaminación del agua empiezan por la polución que existe en los alcantarillados municipales, así mismo, la descarga de los residuos urbanos, industriales y agrícolas proliferan la contaminación de estos. Se estima que, aproximadamente en México se cuentan con 431.7 m<sup>3</sup> /s de aguas residuales municipales y no municipales. Dentro de las municipales, se estima que el 40.5 % se tratan mientras

que las aguas no municipales solo se cuentan con un 15.85 % que son tratadas, dando por consecuencia que el restante sea utilizado con otro fin antropogénico.

De igual manera, García (2018), indica que el suministro del agua en la república mexicana manifiesta diferentes problemáticas; van desde el uso indiscriminado de extracción de mantos acuíferos, mala gestión y distribución en las redes de agua, contaminación y la falta de un control sobre las concesiones. Se estima que, el 77 % es concesionada para la agricultura, 14 % para suministro público, 5 % producción y generación de energía y finalmente el 4 % para la industria. En esa misma línea, a distribución regional, se divide en 3 grupos de disponibilidad (Figura 1): 1) baja disponibilidad, con apenas 8 % del agua renovable nacional; 2) disponibilidad media, con 38 % del agua nacional; 3) alta disponibilidad, con 54 % del agua total (López-Morales, 2017).



Figura 1. Regiones hidrológico-administrativas y zonas de disponibilidad. Fuente: López-Morales, 2017

### 2.3. El agua en la comarca lagunera

La Comarca Lagunera debe su nombre a las antiguas lagunas que se encontraban en la región (Secunza-Schott y Vargas-Flores, 2017). Se debe a su gran amplitud de lagunas que había, principalmente la Laguna de Mayrán, la cual, hoy en día se encuentra desaparecida por diferentes construcciones en el sistema de regulación. Es a partir de este evento que se pretende interpretar intencionadamente el desarrollo urbano de la Comarca Lagunera después del desecamiento (Barrios-Avalos, 2019).

### 2.3.1. Ubicación geográfica

La región Lagunera, se compone de quince municipios de los estados de Coahuila y Durango, localizados en el noroeste mexicano (Barrios-Avalos, 2019). A inicios del siglo XX, se empezaron a desencadenar los primeros casos de hidroarsenicismo, puntualizados en los municipios de San Pedro de las Colonias, Tlahualilo y Francisco I. Madero conocido como Chavéz. Posteriormente, se registraron datos en donde Lerdo, Gómez Palacio, Torreón, Delicias, Nazas, entre otros se sumaban a la lista (Enríquez-Robledo *et al.*, 2021).

### 2.3.2. Hidroarsenicismo en la comarca lagunera

Se registró que en la Comarca Lagunera en los años de 1958 era una región con hidroarsenicismo crónico. Dando inicio a una época donde empezaron a ser visibles los primeros efectos en la salud, entre ellas: la enfermedad de los pies negros, abortos espontáneos y esterilidad. El comienzo del desarrollo de este metaloide, recae en los procesos geológicos como la disolución de rocas y erosión, las cuales son transportadas corrientes fluviales, siendo depositados dentro de la cuenca endorreica que conforma la Laguna de Mayrán. Por otra parte, investigaciones realizadas, dan a conocer que en diversos lugares hay presencia de metales pesados como, Cadmio, Plomo, Renio y Mercurio, lo cuales provocan daños en la salud humana, se estima que aproximadamente 16 millones de personas son intoxicadas por arsénico en todo el mundo (Rivera-Carranza, 2016).

Por otro lado, Enríquez-Robledo *et al.* (2021) menciona que, la disponibilidad de altos niveles de arsénico en subsuelo, se correlaciona con modelos de producción enfocadas en las cuencas lecheras y agricultura. Se dice que en 1950 las aguas de la Laguna tenían una profundidad de 40 metros y para el 2016 entre 300 y 400 metros. Cabe resaltar que la Norma Oficial Mexicana permite 25 µg/L (NOM-127-SSA1-1994), por ello, Morales-Amaya *et al.* (2021), recomienda mejorar o desarrollar metodologías adecuadas para la remoción de As en agua potable a valores por debajo de límites inocuos.

#### 2.4. Tratamientos de aguas contaminadas con arsénico (As)

En los últimos años se han realizado numerosos estudios de técnicas de remoción del arsénico. Los métodos que se utilizan actualmente son: el intercambio iónico, la fitorremediación, adsorción, precipitación química y electrocoagulación. Aunque estos procesos son útiles para eliminar el arsénico del suelo y del agua, cada innovación tiene sus desventajas significativas, particularmente costes y eficacia (Alka *et al.*, 2021).

El intercambio iónico es un proceso de ablandamiento de agua o la eliminación de la dureza, en el cual, el calcio y el magnesio que están presentes en el agua son reemplazados por sodio (Sela, 2019); además de ser un intercambio reversible y estequiométrico de iones entre una fase sólida iónica y una fase líquida externa, sin un cambio sustancial de la estructura del sólido (Byrne, 2021). Por otro lado, se entiende por fitorremediación a la técnica que utiliza plantas o microbios para reducir niveles de peligrosidad en contaminantes nocivos al agua, aire y suelo, mediante métodos como: eliminación, destrucción, secuestro, remediación, extracción, absorción, inmovilización y estabilización de contaminantes (Kanwar *et al.*, 2020).

Menéndez-Gutiérrez y Pérez-Olmo (2021) nos dicen que, la adsorción es aquella que involucra la acumulación o concentración de sustancias en una superficie o también llamada interfases; entre las más comunes en un sistema bifásico son: líquido-líquido; gas-líquido; o líquido-sólido. Así mismo, es de suma importancia, saber que la sustancia que se desea adsorber es denominada soluto o adsorbato, mientras que la que se adsorbe se identifica como adsorbente.

La precipitación química, es un simple y efectivo. Este proceso funciona como agentes precipitantes químico, los cuales reaccionan con iones metálicos y los convierte en partículas sólidas insoluble y por consecuencia, su método de separación será por sedimentación o filtración (Peng y Guo, 2020).

Y en cuanto a la electrocoagulación, es un proceso electroquímico; utiliza corriente continua y electrodos de sacrificio para eliminar los contaminantes en las aguas residuales. El proceso reduce el uso de reactivos químicos y gracias a su alto grado

de remoción de contaminantes, da como resultado un mayor potencial de reutilización del agua (Mroczek *et al.*, 2019).

Los procesos de tratamiento para la remoción de As se instalan principalmente en los tratamientos de agua potable; los más manejados son la coagulación (con sales férricas, también llamada precipitación química) combinada con la filtración y la adsorción en medios (normalmente) a base de Fe (Hering *et al.*, 2017).

Por otra parte, los residuos generados de actividades antropogénicas que involucran el uso del arsénico han ocasionado la polución de diversas zonas, por lo que es importante tomar medidas de mitigación o reducción de este elemento en aguas y suelo. Diversos estudios involucran el tratamiento biológico; este método se ha realizado en los últimos años, con el fin de optimizar el inóculo, el diseño del biorreactor así como de los parámetros cinéticos y fisicoquímicos, obteniendo mayor eficiencia de remoción (Rangel-Montoya *et al.*, 2015).

Cabe resaltar que, no sólo se deben a derrames industriales y a su la eliminación inadecuada de residuos (que conducen a su lixiviación en aguas subterráneas), sino también por las actividades naturales de las aguas geotérmicas que provocan su movilización desde las rocas (Kaushik *et al.*, 2018).

La tecnología de adsorción se ha utilizado ampliamente para tratar aguas subterráneas con arsénico; ayudando a minimizar las concentraciones de arsénico a 10 µg/litro. Sin embargo, su eficacia se ve afectada por una serie de características y contaminantes del agua no tratada. El medio utilizado para la adsorción suele ser en columna. Cuando los sitios de adsorción alcanzan el umbral, la columna debe regenerarse o sustituirse por un nuevo medio. Los medios de adsorción más utilizados para la eliminación de arsénico incluyen alúmina activada (AA), arena recubierta de hierro, hidróxido férrico granular, cartuchos, filtros autóctonos y otros adsorbentes mixtos. La eficacia depende del consumo de agente oxidante que ayuda a adsorber el arsénico (Bibi *et al.*, 2016).

Chen *et al.* (2021) aluden que una buena solución es el utilizar el ion calcio, puesto que este puede ayudar a aumentar la eficacia de la coagulación en el tratamiento

de aguas residuales, gracias a la formación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y por consecuente, conducir a la remoción del arsénico por precipitación de barrido.

Por ello, el desarrollo de tecnologías para la eliminación del arsénico del agua de consumo humano se ha convertido en un importante campo de investigación en todo el mundo (Alam y McPhedran, 2019).

## 2.5. Nopal

Las cactáceas constituyen una de las familias botánicas más abundantes en México. Cuentan con una gran cantidad de géneros y especies, una extraordinaria variabilidad morfológica y adaptación a los distintos tipos de vegetación y medios ecológicos (Montoy-Galicia y Salgado-López, 2019).

El género *Opuntia*, puede crecer en climas áridos y semiáridos con una distribución geográfica que abarca México, América Latina, Sudáfrica y los países mediterráneos. Dentro de las chumberas (género *Opuntia*) los tallos son planos y tienen un crecimiento fijo, produciendo una serie encadenada de almohadillas oblongas o circulares llamadas cladodios. Sus hojas se presentan como espinas y se agrupan en haces puntiagudos y espinosos, los cuales con llamados areolas, derivados de yemas axilares y situadas en los nudos de los tallos, así mismo, son fotosintéticas teniendo un papel muy importante en el depósito de agua, además de que usa el rocío como fuente de agua (Rajbala y Sanjeet, 2023).

Los nopales son de un grupo vegetal con mayor especie y más amplia distribución de los cactus. Los más destacados son *Opuntia* y *Nopalea*, se puede deducir que estos son similares, sin embargo, lo que los hace distinguibles uno de otro es la forma de las flores. El género *Opuntia* tiene una forma similar a copas con pétalos pequeños, en las cuales pueden ser polinizadas por insectos en cambio, en las *Nopalea* sus hojas son elongadas y las polinizan los colibríes. De las 200 especies de nopales que se han descrito, 93 son *Opuntia* y ocho de *Nopalea*, pero solo tres especies de *Opuntia* son endémicas y seis de *Nopalea* (SEMARNAT., 2017)

### 2.5.1. Taxonomía

Cuadro 1. Clasificación taxonomía de la *Opuntia ficus-indica*, según Bravo-Hollis (1978)

Reino:	Vegetal
Subreino:	<i>Embryophita</i>
División:	<i>Angiospermae</i>
Clase:	<i>Dicotyledonea</i>
Subclase:	<i>Dialipetalas</i>
Orden:	<i>Opuntiales</i>
Familia:	<i>Cactaceae</i>
Tribu:	<i>Opuntioideae</i>
Subfamilia:	<i>Opuntiae</i>
Género:	<i>Opuntia</i>
Subgéneros	<i>Platyopuntia</i>
Especies:	Varios Nombres

Por otra parte, Calero-Villegas *et al.* (2022), nos dice que el mucílago se puede clasificar en 2 grupos: a) mucílago neutral: Los mucílagos neutros contienen polímeros lineales heterogéneos de manosa, pero también podemos encontrarlos en la estructura de otros carbohidratos; pueden ser glucomanos si tienen D-manosa y D-glucosa, los que contienen sacáridos presentes en órganos subcelulares. Por ejemplo, las monocotiledóneas producen soluciones de alta viscosidad cuando entran en contacto con el agua.; b) mucílago ácido: Consisten en derivados ácidos de carbohidratos. Estos son clasificados según su familia botánica; un ejemplo son las *Plantaginaceae*, ricas en D-galactosa y ácidos urónicos.

### 2.5.2. Nopal como adsorbente

Primeramente, hay que hacer énfasis en que “adsorción” no es lo mismo que “absorción” ya que esta es el proceso en las que las sustancias penetran al interior de líquidos, bloques, cristales, etc., y, por otro lado, la definición de “adsorbente” es un proceso en donde una molécula u ion el cual es llamado adsorbato se encuentra

un estado de masa de gas o líquida, en donde, este se adhiere en la superficie de un sólido llamado adsorbente. En otras palabras, procedimiento en el cual consiste en la captación de moléculas de la superficie externa o interna de paredes capilares, ya sea de sólidos o líquidos (Artioli, 2008; Abdelfattah *et al.*, 2020; Britannica, 2023).

Abdelfattah *et al.* (2020) reporta que existen diferentes materiales utilizados para la adsorción de metales pesados; entre ellos, el más utilizado es el carbón activado, sin embargo, durante los últimos años se ha estudiado el cactus en el tratamiento de aguas, puesto que, este se encuentra en mayor abundancia y accesibilidad, así como, su biodegradabilidad. Dentro de sus ventajas es que éste ayuda a eliminar colorantes, pesticidas, metales pesados y turbidez. Bajo este contexto, se indica que los adsorbentes a base de cactus son una alternativa para la remoción de contaminantes en el agua.

Por otra parte, Nghia *et al.* (2021) dice que es posible usar nanopartículas magnéticas combinado con biomasa del nopal para adsorber y eliminar metales pesados de las aguas residuales y así aprovechar una fuente abundante de biomasa que aún no se ha explorado extensamente.

Así mismo, dentro de sus beneficios encontramos: a) bajo coste; b) facilidad de uso; c) abundancia, hace que sea un material con grandes cualidades de ser un biosorbente ecológico (Rimawi *et al.*, 2020). No obstante, cabe resaltar que gracias a su porosidad en comparación con otros biomateriales, lo hace más atractivo para amplio manejo en la remoción de metales pesados (Nouri *et al.*, 2021).

Con lo anterior, también es importante resaltar que existe un interés creciente por los polímeros a base de mucílago de nopal en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Estos biocoagulantes se han utilizado ampliamente en procesos de depuración, separación y recuperación de aguas residuales (Adjeroud-Abdellatif *et al.*, 2020). Es importante destacar que, según diversas investigaciones, el método más usado en la remoción de arsénico a base de mucílago es el de coagulación-floculación.

Bajo este contexto, Torres y Carpinteyro-Urban (2012), ha reportado que dentro del proceso de coagulación-floculación se ha aplicado para tratar aguas residuales municipales e industriales. Sin embargo, una de las desventajas es la generación de lodos residuales; estos lodos contienen grandes cantidades de metales, ya que los coagulantes preferidos son sales de Al y Fe.

Por otra parte, Otálora *et al.* (2022) reportan que, los coagulantes a base de polisacáridos, como el mucílago, tiene un gran auge para su uso en el tratamiento de aguas residuales, gracias a su capacidad para eliminar la turbidez, los sólidos disueltos, los colorantes y la demanda química de oxígeno (DQO).

Trindade *et al.* (2021) menciona que, hay un nuevo interés por encontrar tratamientos de aguas residuales asequibles y no agresivos con el medio ambiente para minimizar el uso de productos químicos, lo cuales tiene efectos secundarios en la salud humana, y así lograr un tratamiento más sostenible de las aguas residuales.



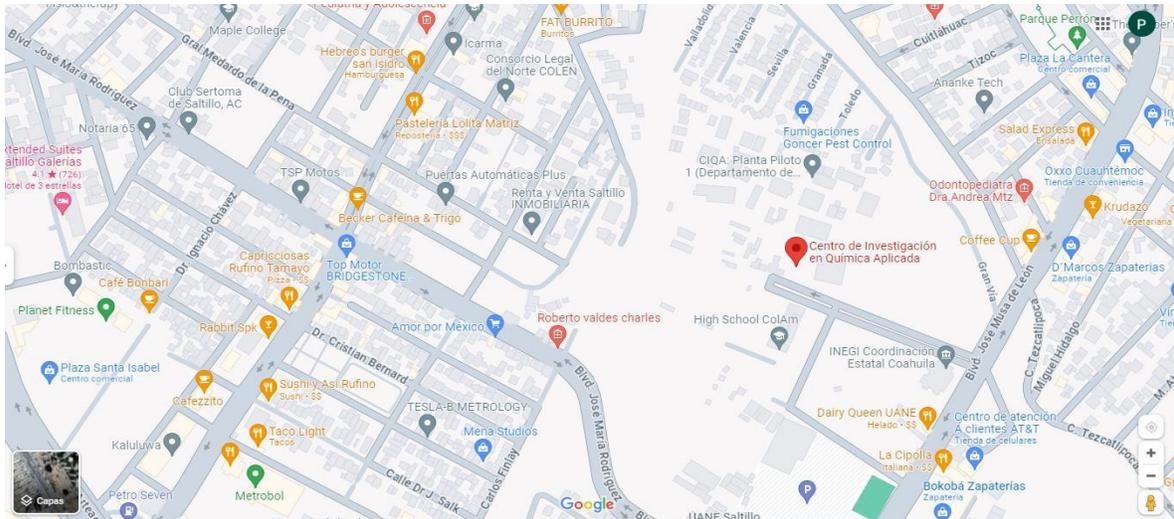


Figura 3. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila.

Bajo un periodo de los meses de agosto-diciembre 2023, en una temporada de otoño-invierno. Siendo el principal objetivo evaluar el potencial del nopal como bioadsorbente para la remoción de arsénico.

### 3.2. Recolección y secado de nopal

Para esta fase se recolectaron 100 nopales de las pencas de las UAAAN-UL; las cuales posteriormente se cortaron en cuadros de dos cm aproximadamente y se dejaron al sol directo por tres días, donde cada dos horas se les daba vuelta, esto para hacer más rápido el proceso de deshidratación; por consiguiente, se colocaron los nopales en la estufa marca Felisa a 60°C por dos días, hasta su secado completo, evitando que este se quemara.



Figura 4. Nopal después de 3 días en el sol



Figura 5. Resultado del nopal después de la estufa.

### 3.3. Obtención del polvo de nopal

Domínguez-Canales *et al.* (2011) nos dice que para recuperar el nopal seco se tiene que colocar en un mortero de porcelana, sin embargo, no se cuenta con el material mencionado, por lo cual se optó por usar una nutribullet y se tritura hasta obtener un polvo blanquecino relativamente fino, así mismo, por consiguiente se pasó por un tamiz de malla 40 ultrafino de acero inoxidable (203 mm (8 pulgadas) de diámetro) para una mejor separación de partículas que no se hayan triturado bien previamente.

No obstante, es importante recalcar que por cada 10 nopales se obtienen 100 gramos (gr) de polvo de nopal. El cual, posteriormente, se almacenó en un frasco de vidrio de 1 litro el cual fue esterilizado en una autoclave.

### 3.4. Evaluación del adsorbente

#### 3.4.1. Análisis

Sé caracterizo la “harina del nopal” en el CIQA en donde corrieron las pruebas de humedad, materia orgánica y cenizas, aplicando métodos gravimétricos.

Por otro lado, en primera estancia, se tomó como referencia el método propuesto por Olivero-Verbel *et al.* (2013) evaluando el coagulante o adsorbente en 2 factores: 1) velocidad de agitación (100 y 200 rpm) el cual se modificó para ser evaluado el tiempo de residencia y por último; 2) la concentración del adsorbente (200 g de harina de nopal).

#### 3.4.2. Prueba de remoción de arsénico

Para evaluar su eficiencia en la remoción de arsénico se hizo una preparación de “agua artificial” de 100 mL con una concentración de 100 partes por millón (ppm) de arsénico.

Posteriormente, las pruebas se realizaron de dos maneras:

- a) Mezcla directa de la solución sintética de arsénico de 100 mg/L con una cantidad de harina de nopal. Se pesaron 200 g de harina de nopal y se le agregó agua destilada y 10 mL de solución de 100 mg/L de As. Se puso en agitación magnética por tres días

Al final se tomó muestra del líquido resultante, 10 mL, y se aforaron a 100 mL y se pasaron a ICP para su análisis de arsénico.

- b) Tratamiento en columna de harina de nopal de 100 mL de una solución de 100 ppm de arsénico, haciéndola pasar a través de la columna.

Es importante destacar que, diversos autores han recomendado y utilizado el tratamiento de jarras o experimento de adsorción por batch para el análisis de coagulantes o adsorbentes (Vecino *et al.*, 2016; Deus *et al.*, 2021; Martínez-Cruz *et al.*, 2021). Por otro lado, en la metodología planteada por Deshmukh y Hedao (2019) nos dice que para una mayor eficiencia de remoción hay que dejar en agitación durante 3 minutos, terminando este proceso, dejar sedimentar durante 30 minutos.

Sin embargo, para la presente investigación se preparó la muestra por disolución ácida para su posterior análisis de elementos químicos mediante la técnica de ICP.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para esta fase se cuentan con resultados preliminares; los primeros datos arrojados son cualitativos, esto quiere decir que únicamente colocaron análisis de caracterización (Cuadro 2), en conjunto con las pruebas de remoción y sus observaciones. Posteriormente, se espera contar con el porcentaje de remoción de cada uno de los tratamientos utilizados, analizadas mediante la ICP.

##### 4.1. Resultados de los análisis

Cuadro 2 .Resultados de la caracterización de la harina de nopal.

Muestra	% humedad	% materia orgánica	% ceniza
Harina de nopal	1.50	66.4	22.7

Notas:

1. La humedad se determinó por secado en estufa a 105 °C por 12 horas
2. La materia orgánica se determinó por método de combustión a 550°C por 2 horas
3. La ceniza se determinó por calcinación a 900°C por 6 horas

Con lo anterior, según los resultados obtenidos por Rives-Castillo *et al.* (2021) indica que la harina de nopal tiene una humedad de 5.12 % y en cuando al análisis de cenizas menciona que varía según la época o meses del año, esto porque se observa que obtuvo un 24.61 % en el mes de septiembre en comparación a mayo que fue de 16.46 % y agosto en un 19.92 %.

##### 4.2. Remoción de arsénico mediante la ICP

Pendiente de analizar y conocer el resultado para calcular el porcentaje de remoción de arsénico en la ICP, técnica que es analizada por Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

###### 4.2.1. Mezcla directa

#### 4.2.2. Tratamiento en columna

##### Observaciones:

- a) En ambos casos las soluciones resultantes del tratamiento con la harina de nopal toman una coloración muy fuerte color amarillo paja (Figura 6)
- b) La harina de nopal se hidrata y aumenta su volumen considerablemente y retiene humedad aproximadamente de un 70 % (Figura 7)

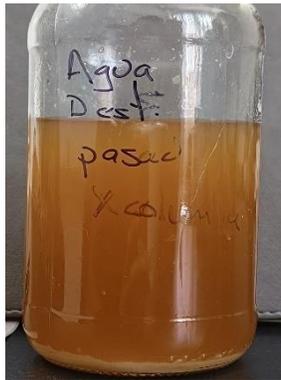


Figura 6. Solución final con tratamiento de columna



Figura 7. Harina de nopal después del tratamiento de columna.

Aunado a los datos obtenidos, se tiene la hipótesis de que la harina de nopal si tiene capacidad bioadsorbente, incluso tiene potencial de ser un biomaterial que aunado con la nanotecnología se podría utilizar para retener humedad en suelos, alargando la vida de la planta en caso de sequía.

Bajo este contexto, Vargas-Solano *et al.* (2022) menciona en un estudio, que el nopal como coagulante tiene capacidades para reducir la concentración del Hierro (Fe) y del Manganese (Mn), siendo así apto para el consumo humano, de igual manera, se destaca que el método utilizado fue de jarras en conjunto con un análisis de caracterización fisicoquímico.

No obstante, Rodríguez-Romero *et al.* (2020) nos dice que la activación del cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) de la biomasa del *Opuntia ficus-indica* tiene resultados competitivos

como adsorbente de arsénico en agua, siendo una alternativa comprometedora para la remoción de este metaloide.

Por otro lado, en la investigación realizada por Contreas-Lozano *et al.* (2015 ) nos hace hincapié de que el *O. ficus-indica* en combinación con un coagulante a base de sulfato de aluminio tiene mayor efectividad para su uso en la clarificación de aguas superficiales; teniendo como ventaja la reducción de turbidez en un 1.70 NTU, ayuda en la reducción de color y elimina STD (Sólidos Totales Disueltos).

## 5. CONCLUSIÓN

La remoción de arsénico de aguas de abastecimiento mediante su tratamiento con harina de nopal con los resultados preliminares obtenidos y sus observaciones se puede deducir que por sus características puede cumplir con el objetivo planteado.

Así mismo, dentro de los análisis de la caracterización de la mismo, demostró tener una humedad inicial de 1.50 %, 66.4 % M.O. (materia orgánica) y finalmente 22.7 % cenizas. Sin embargo, es importante mencionar que una vez que la harina de nopal se deja secar después de haber tenido contacto con el agua, está se hidrata, aumentando su volumen y reteniendo la humedad aproximadamente un 70 %, esto se puede deber a la naturaleza del nopal y posiblemente a su ingrediente activo como lo es el mucílago.

Por otro lado, las pruebas para la remoción de arsénico dejaron una coloración en agua muy fuerte de amarillo paja, por lo cual es necesario el usar algún tratamiento para la remoción de color.

Finalmente, se puede deducir que la capacidad del *O. ficus-indica* como bioadsorbente natural para la remoción de As en aguas, es una buena alternativa que no genera daños medioambientales por ser natural, sin embargo, se debe combinar con otros tratamientos de aguas para eliminar la colorimetría que este deja; igualmente es recomendable que se pueda estandarizar una dosis de harina de nopal por litro de agua.

## 6. LITERATURA CITADA

Abdelfattah, A., A. Basem, E. Moutaz M, M. Wissem y B. R. Faouzi 2020. "Cactus material-based adsorbents for the removal of heavy metals and dyes: a review." *Materials Research Express* 7.

Adjeroud-Abdellatif, N., Y. Hammoui, A. Boudria, S. Agab, F. Choulak, L. Jean-Pierre, B. Merzouk y K. Madani 2020. "Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus-indica* cladode on electrocoagulation-electroflotation water treatment process." *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 102: 5822-5846.

Alam, R. y K. McPhedran 2019. "Applications of biological sulfate reduction for remediation of arsenic-A review." *Chemosphere* 22: 932-944.

Ali, W., A. Rasool, M. Junaid y H. Zhang 2019. "A comprehensive review on current status, mechanism, and possible sources of arsenic contamination in groundwater: a global perspective with prominence of Pakistan scenario." *Environmental Geochemistry and Health* 41: 737-760.

Alka, S., S. Shahir, N. Ibrahim, M. J. Ndejiko, D. V. N. Vo y F. A. Manan 2021. "Arsenic removal technologies and future trends: A mini review." *Journal of Cleaner Production*. 278: 123805.

Alkurdi, S. S., R. A. Al-Juboori, J. Bundschuh, L. Bowtell y A. Marchuk 2021. "Inorganic arsenic species removal from water using bone char: A detailed study on adsorption kinetic and isotherm models using error functions analysis." *Journal of Hazardous Materials* 405.

Artioli, Y. 2008. "Adsorption." *Encyclopedia of Ecology*: 60-65.

Baquerizo-Cabrera, M., M. L. Acuña-Cumba y M. E. Solis-Castro 2019. "Contamination of river: case Guayas river and its affluent." *Manglar* 16(1): 63-70.

- Barrios-Avalos, J. J. 2019. "Más allá del Agua: desarrollo urbano de la Comarca Lagunera México después de la regulación del río Nazas." XI Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Santiago de Chile.
- Bibi, S., M. A. Kamran, J. Sultana y A. Farooqi 2016. "Occurrence and methods to remove arsenic and fluoride contamination in water." *Environmental Chemistry Letters* 15(1): 125-149.
- Bravo-Hollis, H. L. C. d. M. U. A. d. M., México. 1978. "Las Cactáceas de México." Universidad Autónoma de México, México. 2(1).
- Britannica, T. E. o. E. 2023. adsorption. *Encyclopedia Britannica*.
- Byrne, C. E. 2021. Trabajo Práctico N° 12: Intercambio iónico. Repositorio Institucional de la UNLP, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/120603>
- Calero-Villegas, M. P., C. Esquivel-Álvarez, E. Quesada-Morales, M. F. Rojas-Salas, M. Chavarría-Rojas y G. Madrigal-Redondo 2022. "A Look at the Role of Mucilage at the Industrial Level." *Pharmacognosy Communications* 12(1): 7-17.
- Canedo, F. P. 2023. Agua en La Laguna supera niveles de arsénico en al menos 93 pozos. Siglo de Torreón <http://www.gtrs.edu>
- Chen, M., Z. Chen, P. Wu y J. P. Chen 2021. "Simultaneous oxidation and removal of arsenite by Fe(III)/CaO<sub>2</sub> Fenton-like technology." *Water Research* 201: 117312.
- Contreas-Lozano, K. P., Y. Aguas-Mendoza, J. G. Salcedo-Mendoza, R. Olivero-Verbel y G. P. Mendoza-Ortega 2015 "El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. ." *Producción + Limpia* 10 (1): 40-50.

- Deshmukh, S. O. y M. N. Hedao 2019. "Wastewater Treatment Using Bio-Coagulant as Cactus *Opuntia ficus-indica*." International Journal for Scientific Research & Development 6.
- Deus, L. C., C. M. F. Silva, M. F. Martins, T. M. Aversa y E. F. Lucas 2021. "Removing ammonium from water using porous resins: influence of polymer structure, ion exchange capacity and porosity." Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín 88(217): 236-246.
- Domínguez-Canales, V. S., J. A. Zegbe-Domínguez, M. Dolores-Alvarado Nava y J. Mena-Covarrubias 2011. "Extracción y purificación de mucílago de NOPAL." Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias 21.
- Enríquez-Robledo, A. d. C., H. G. Hernández-Alvarado y J. A. Morales-Pérez 2021. "Hydroarsenism in the Lagunera Región and Public Policies." Revista Enfoques 19(35): 21-43.
- EPA 2022. Types of Drinking Water Contaminants. Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/ccl/types-drinking-water-contaminants>
- Espinosa, G. 2021. México-Al menos 24 estados en México presentan altos niveles de arsénico en el agua. (Sopitas). Agua.org.mx. , <https://www.sopitas.com/noticias/arsenico-24-estados-mexico-altos-niveles-arsenico-agua-quinto-elemento-lab-data-civica/>
- Fonseca-Sánchez, A., H. Madrigal-Solís, C. Núñez-Solís, H. Calderón-Sánchez, G. Moraga-López y A. Gómez-Cruz 2019. "Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica." Uniciencia. 33(2): 76-97.
- García, L. 2018. "Problemáticas económicas del agua en México." Ciencia UNAM, DGDC. Universidad Nacional Autónoma de México.

- García, S. I. 2011. " Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico HACRE: Módulo de Capacitación." Ministerio de Salud de la Nación. Programa Nacional de Prevención y Control de las Intoxicaciones, 1a ed. Buenos Aires.
- Genchi, G., G. Lauria, A. Catalano, A. Carocci y M. S. Sinicropi 2022. "Arsenic: A Review on a Great Health Issue Worldwide." Applied sciences 12: 6184.
- Ghosh, M. 2015. Introduction to Arsenic and Arsenicosis. ResearchGate., [https://www.researchgate.net/publication/271644301\\_Introduction\\_to\\_Arsenic\\_and\\_Arsenicosis34](https://www.researchgate.net/publication/271644301_Introduction_to_Arsenic_and_Arsenicosis34)
- Grijalva-Endara, A. D. L. M., M. E. Jiménez-Heinert y H. X. Ponce-Solórzano 2020. "Contaminación del agua y aire por agentes químicos." Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento 4(4): 79-93
- Hammed, A., S. Akhtar, A. Amjad, I. Naeem y M. Tariq 2019. "Comparative Assessment of Arsenic Contamination in Raw Milk, Infant Formulas and Breast Mil." Journal of Dairy & Veterinary Sciences 13(1).
- Hao, L., M. Liu, N. Wang y G. Li 2018. "A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents." RSC Advances. Royal Society of Chemistry.
- Hering, J. G., I. A. Katsoyiannis, G. A. Theoduloz, M. Berg y S. J. Hug 2017. "Arsenic Removal from Drinking Water: Experiences with Technologies and Constraints in Practice." Journal of Environmental Engineering 143(5).
- Hong, Y. S., B. J. Ye, Y. M. Kim, B. G. Kim, G. H. Kang, J. J. Kim, K. H. Song, Y. H. Kim y J. W. Seo 2017. "Investigation of Health Effects According to the Exposure of Low Concentration Arsenic Contaminated Ground Water." International Journal of Environmental Research and Public Health 14(12):

- Jiménez-Cisneros, B., M. L. Torregrosa-y Armenta y L. Aboites-Aguilar 2010. "Los retos del agua. El agua en México: causas y encauses." Academia Mexicana de Ciencias-CONAGUA. México.: 51-75.
- Kanwar, V. S., A. Sharma, A. L. Srivastav y L. Rani 2020. "Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review." *Environmental Science and Pollution Research* 27: 44835–44860
- Kaushik, V., Y. Duan, B. Jung, B. Batchelor y A. Abdel-Wahab 2018. " Arsenic removal using advanced reduction process with dithionite/UV—A kinetic study." *Journal of Water Process Engineering*, 23: 314-319.
- Kılıç, Z. 2020. "The importance of water and conscious use of water." *International Journal of Hydrology* 4(5): 239-241.
- Kuivenhoven, M. y K. Masón 2022. "Arsenic Toxicity." In *StatPearls*. StatPearls Publishing
- López-Morales, C. A. 2017. "El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica." *El estado del agua en México: retos, oportunidades y perspectivas*. .
- Martínez-Cruz, A., M. N. Rojas-Valencia, J. A. Araiza-Aguilar, H. A. Nájera-Aguilar y R. F. Gutiérrez-Hernández 2021. "Leachate treatment: comparison of a bio-coagulant (*Opuntia ficus mucilage*) and conventional coagulants using multi-criteria decision analysis." *Heliyon* 7.
- Mendoza-Cano, O. 2017. "Metales pesados y el agua de consumo en Colima una cuestión de salud pública." *Universidad de Colima*
- Menéndez-Gutiérrez, C. y J. Pérez-Olmo 2021. "Elementos Prácticos para el tratamiento de aguas residuales mediante el procesos de adsorción." *Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría*.

Monteiro De Oliveira, E. C., E. S. Caixeta, V. S. Santos y B. B. Pereira 2021. "Arsenic exposure from groundwater: environmental contamination, human health effects, and sustainable solutions." *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 24(3): 119-135.

Montoy-Galicia, A. S. y J. D. Salgado-López 2019. "Extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica*, Nopal, como potencial purificador de agua en comunidades rurales de Ahuachapán." *Bioma* 9: 52-65.

Morales-Amaya, C. G., M. T. Alarcón-Herrera, P. D. Astudillo-Sánchez, S. A. Lozano-Morales, L. Licea-Jiménez y L. Reynoso-Cuevas 2021. "Ferrous Magnetic Nanoparticles for Arsenic Removal from Groundwater." *Water*, 13: 2511.

Mroczek, E. K., D. Graham y L. Bacon 2019. "Removal of arsenic and silica from geothermal fluid by electrocoagulation." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(14).

NCI. 2015. Arsenic. National Cancer Institute  
<https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/arsenico>

Nghia, T., T. B. Loan, T. C. Thach y T. T. Ngoc 2021. "Heavy metal removal from polluted water by Nopal cactus biopolymer-based magnetic nanocomposites." *International Journal of Nanoparticles* 13(1).

Nouri, H., A. Abdedayem, I. Hamidi, S. Souissi-Najjar y A. Ouederni 2021. "Biosorption of lead heavy metal on prickly pear cactus biomaterial: kinetic, thermodynamic and regeneration studies " *Cellulose Chemistry and Technology* 55(7-8): 919-932.

Olabode-Fatoki, J. y J. Abiodun-Badmus 2022. "Arsenic as an environmental and human health antagonist: A review of its toxicity and disease initiation." *Journal of Hazardous Materials Advances* 5: 100052.

- Olivero-Verbel, R. E., I. D. Mercado-Martínez y L. E. Montes-Gazabón 2013. "Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*." *Producción + Limpia* 8(1): 19-27.
- Olmos, V. y A. S. Ridolfi 2018. "Hydroarsenicism: Mechanisms of action related to arsenic toxicity." *Acta Toxicológica Argentina* 26(1): 32-44.
- OMS 2022. Arsénico. Organización Mundial de la Salud, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic#:~:text=El%20ars%C3%A9nico%20es%20muy%20t%C3%B3xico,alimentos%20y%20regar%20cultivos%20alimentarios>
- Otálora, M. C., A. Wilches-Torres, C. R. Lara, G. R. Cifuentes y J. A. Gómez Castaño 2022. "Use of *Opuntia ficus-indica* Fruit Peel as a Novel Source of Mucilage with Coagulant Physicochemical/Molecular Characteristics." *Polymers* 14: 3832.
- Peng, H. y J. Guo 2020. "Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review." *Environmental Chemistry Letters* 18(6): 2055–2068.
- Rajbala, S. y K. Sanjeet 2023. "*Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): A review." In *Unexplored Food Plants* 1-8.
- Rangel-Montoya, E. A., L. E. Montañez-Hernández, M. P. Luévanos-Escareño y N. Balagurusamy 2015. "Impact of arsenic on the environment and its microbial transformation." *Terra Latinoamericana* 33(2): 103-118.
- Rimawi, W. H., S. Shaheen y H. Salim 2020. "Removal of Chromium Ions from Tannery Wastewater using Cactus Powder." *Oriental Journal of Chemistry* 38(1): 132-138.

Rivera-Carranza, E. 2016. "Afectaciones a la salud por la presencia de arsénico (arsenicismo) en la Comarca Lagunera." Servicio Geológico Mexicano. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Rives-Castillo, S. C. H., Z. N. Correa-Pacheco, S. Bautista-Baños, R. I. Ventura-Aguilar, B. S. Schettino-Bermudez, P. Ortega-Gudiño y A. Barajas-Cervantes 2021. "Análisis químico proximal y térmico en harinas de productos residuales de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para la obtención de compuestos poliméricos biobasados. ." *AgroCiencia* 55: 406-416.

Rodríguez-Heredia, D. 2017. "Intoxicación ocupacional por metales pesados." *Revista Médica de Santiago de Chile* 21(12): 3372-3385.

Rodríguez-Romero, J. A., D. I. Mendoza-Castillo, H. E. Reynel-Ávila, D. A. de Haro-Del Rio, L. M. González-Rodríguez, A. Bonilla-Petriciolet, C. J. Duran-Valle y K. I. . Camacho-Aguilar 2020. "Preparation of a new adsorbent for the removal of arsenic and its simulation with artificial neural network-based adsorption models." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8.

Sanjrani, M. A., B. Zhou, H. Zhao, S. A. Bhutto, A. S. Muneer y S. B. Xia 2019. "Arsenic contaminated groundwater in China and its treatment options, a review." *Applied Ecology and Environmental Research* 17(2): 1655-1683.

Sanyal, T., P. Bhattacharjee, S. Paul y P. Bhattacharjee 2020. "Recent Advances in Arsenic Research: Significance of Differential Susceptibility and Sustainable Strategies for Mitigation." *Frontiers in Public Health*.

Secunza-Schott, C. P. y A. Vargas-Flores 2017. "Problemática del agua en la Comarca Lagunera." Instituto Municipal de Planeación y Competitividad de Torreón.

Sela, G. 2019. Intercambio Iónico. Cropaia,  
<https://cropaia.com/es/blog/intercambio-ionico/>

SEMARNAT. 2017. Nopal, planta que documenta la historia de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.,

<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/nopales-previo?idiom=es#:~:text=Del%20nopal%20son%20los%20mayores,la%20Ilegada%20de%20los%20espa%C3%B1oles.>

Sharma, A. K., J. C. Tjell, J. J. Sloth y P. E. Holm 2014. "Review of arsenic contamination, exposure through water and food and low cost mitigation options for rural areas." *Applied Geochemistry* 41: 11-33.

Soumika, R. y S. Soma 2021. "Review On Arsenic Toxicity: Effect On Human Health And Biochemical Aspects." *International Journal of Chemical and Environmental Sciences* 3(1): 14-30(17).

SRE 2013. Información General de México. Secretaría de Relaciones Exteriores

<https://embamex.sre.gob.mx/republicadominicana/index.php/avisos/2-uncategorised/127-informacion-general-sobre-mexico#:~:text=Es%20un%20pa%C3%ADs%20situado%20en,poniente%20con%20el%20Océano%20Pacífico.>

Torres, L. y S. Carpinteyro-Urban 2012. "Use of *Prosopis laevigata* Seed Gum and *Opuntia ficus-indica* Mucilage for the Treatment of Municipal Wastewaters by Coagulation-Flocculation." *Natural Resources* 3(2): 35-41.

Trindade, S., M. I. Rouxinol, J. Nabais y A. C. Agulheiro-Santos 2021. " Evaluation of the Potential of *Opuntia ficus-indica* Cladodes as a Natural Flocculant for Wastewater Treatment through Simple Procedures." *Journal of Ecological Engineering* 22(5): 249-257.

Valdés-Perezgasga, F. 2007. Arsénico en La Laguna. La jornada Ecológica

<https://www.jornada.com.mx/2007/11/26/eco-c.html>

Vargas-Solano, S. V., F. Rodríguez-González, R. Martínez-Velarde, S. S. Morales-García y M. P. Jonathan 2022. "Removal of heavy metals present in water

from the Yautepec River Morelos México, using *Opuntia ficus-indica* mucilage." *Environmental Advances* 7: 100160.

Vecino, X., R. Devesa-Rey, D. M. De Lima Stebbins, A. B. Moldes, J. M. Cruz y N. A. Alcantar 2016. "Evaluation of a cactus mucilage biocomposite to remove total arsenic from water." *Environmental Technology & Innovation* 6: 69-79.

Villaamil-Lepori, E. C. 2015. "Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina." *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana* 49(1): 83-104.

Wan, X., M. Lei y T. Chen 2020. "Review on remediation technologies for arsenic-contaminated soil." *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 14(2): 24.

Wang, N., Z. Ye, L. Huang, C. Zhang, Y. Guo y W. Zhang 2023. "Occurrence and Cycling in the Aquatic Environment: A Comparison between Freshwater and Seawater." *Water* 15 (1): 147.

Yanicelli, M. T. 2015. "Nº 1. Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE)." Dirección Nacional de Determinación de la Salud e investigación. Argentina.