

Aguirre de los Santo, Y.L., Vázquez-Sánchez, A.Y., Abatal, M., Quiroz-Rodriguez, A. 2025. Potencial de Residuos Agrícolas Mexicanos para la Remoción de Metales Pesados desde Soluciones Acuozas, p. 251-268. En: J.G. Cerón Bretón, R. M. Cerón Bretón y M. López Cisneros (ed.). Tópicos Selectos de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. 366 p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202512.

Potencial de Residuos Agrícolas Mexicanos para la Remoción de Metales Pesados desde Soluciones Acuozas

*Y. L. Aguirre de los Santo¹, A. Y. Vázquez-Sánchez²,
M. Abatal¹ y A. Quiroz-Rodriguez²*

¹ Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Carmen

² Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez

Resumen

En las últimas décadas, se han reportado altas concentraciones de los metales tóxicos como el cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cobalto (Co), níquel (Ni), entre otros, en los diferentes cuerpos de agua. Las investigaciones atribuyen esta problemática ambiental a las diversas actividades antropogénicas como la minería, la fundición, la metalurgia y las industrias de transformación. Por lo tanto, esto conduce a la necesidad de desarrollar técnicas adecuadas de tratamiento de las aguas residuales antes de su descarga para minimizar los efectos nocivos de los metales tóxicos. En este documento, se presentan los diferentes métodos de tratamiento del agua que se utilizan para eliminar los metales pesados del agua. Entre ellos, se destaca el proceso de adsorción, el cual se considera uno de los tratamientos más eficaces para la remoción de los contaminantes. Además, se considera que la funcionalización de los adsorbentes puede mejorar el proceso de adsorción. Por ello, se destacan los residuos agrícolas como biosorbentes por su abundancia y diversidad en México. El principal objetivo del presente capítulo de libro es presentar los diferentes residuos agrícolas en México que se han utilizado como biosorbentes y los posibles candidatos que podrían aplicarse para remover los metales tóxicos. Además, se hace hincapié a los efectos de los parámetros que afectan la capacidad de adsorción como el pH y temperatura del medio acuoso, tiempo de contacto, dosis de los adsorbentes y la concentración de los iones metálicos.

Palabras clave: Residuos agrícolas, Biosorción, metales pesados.

Abstract

In recent decades, high concentrations of toxic metals such as Cadmium (Cd), Mercury (Hg), Lead (Pb), Arsenic (As), Cobalt (Co), Nickel (Ni), and others have been reported in various bodies of water. Research attributes this environmental problem to various human activities including mining, smelting, metallurgy, and processing industries. Therefore, it is necessary to develop proper wastewater treatment techniques to minimize the harmful effects of toxic metals before discharge. This document presents different water treatment methods used to remove heavy metals from water. Among these methods, the adsorption process is considered one of the most effective treatments for the removal of contaminants. Furthermore, it is believed that the functionalization of the adsorbents can improve the adsorption process. Agricultural waste stands out as bio-sorbent due to its abundance and diversity in Mexico. The main objective of this book chapter is to present the different agricultural wastes in Mexico that have been used as bio sorbent and the potential candidates that could be applied to remove toxic metals. In addition, emphasis is placed on the effects of the parameters that affect the adsorption capacity such as the pH and temperature of the aqueous medium, contact time, dosage of the adsorbents, and the concentration of metal ions.

Keywords: Agricultural waste, Biosorption, Heavy metals.

Introducción

Cada año, a nivel mundial, se producen una gran cantidad de residuos agrícolas originados en los procesos industriales, por lo tanto, es necesaria, su revalorización para disminuir el volumen de residuos generados, contribuyendo así, a disminuir su impacto ambiental. Por otro lado, el agua juega un papel muy importante en la economía mundial. Sin embargo, este recurso natural se está escaseando en muchos lugares, lo que representa una gran preocupación social y económica (Acharya *et al.*, 2018). Además, la industrialización en grandes medidas es responsable de la contaminación del medio ambiente, especialmente del agua, donde lagos y ríos se ven afectados por los desechos de grandes cantidades volúmenes de sustancias tóxicas, entre las que destacan los metales pesados como el cromo (Cr), plomo (Pb), cobre (Cu), cadmio (Cd) y mercurio (Hg). Estos metales son considerados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) y por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) como los más relevantes en cuanto a su impacto en la salud pública (Gómez *et al.*, 2022). Debido a que estos metales no son biodegradables, tienden a acumularse en los organismos vivos, ocasionando diversas enfermedades y trastornos que, en última instancia, amenazan la vida humana, como se puede ver en la tabla 1 (Acharya *et al.*, 2018).

En México, el método que se usa actualmente para la detección y cuantificación de metales pesados en agua es un método basado en la Norma Mexicana, NMX-AA-051-SCFI-2016, mediante espectrofotometría de absorción atómica en aguas naturales, pota-

bles y residuales (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2016).

Para resolver el problema de la contaminación ambiental, varios investigadores han desarrollado diferentes técnicas como la coagulación, la filtración por membrana, la fotocatálisis, la oxidación, la precipitación, el intercambio iónico, la adsorción, los tratamientos biológicos y electroquímicos. Estas tecnologías de tratamiento han demostrado su eficacia en la eliminación de metales pesados del agua, pero algunos inconvenientes, como su elevado coste, la generación de lodos y el uso de productos químicos caros, han limitado el uso de estas técnicas. Por otro lado, la generación de residuos agrícolas es inevitable debido al procesamiento de materias primas para la producción de alimentos. El crecimiento poblacional requiere aumentar la demanda alimenticia para subsistir, lo que provoca un incremento desmedido en la cantidad de residuos agrícolas.

En México, se producen más de 70 Mt de residuos agrícolas, el 79.4 % corresponde a residuos primarios (paja de cereales, residuos del procesamiento de frutas y hortalizas y residuos de cultivos), y el resto corresponde a residuos de cultivos industriales (arroz, café, tabaco y caña de azúcar). (Quintero *et al.*, 2023). De acuerdo a Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los residuos generados por las actividades agrícolas son considerados como de manejo especial (Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, 2023). En la actualidad, estos residuos forman parte del problema ambiental en México y en el mundo, por ello, se han estado buscando

Tabla 1. Comparación de las directrices actuales de la EPA y la Unión Europea sobre los niveles máximos de metales pesados en agua potable (García et al, 2020) y (EPA, 2009).				
Contaminante	Límite permisible por la US-EPA (mg L ⁻¹)	Límite permisible por la Unión Europea (mg L ⁻¹)	Efectos para la salud	Fuentes de contaminantes
Arsénico	0.010	0.010	Daño en la piel, problemas con el sistema circulatorio, y mayor riesgo de contraer cáncer.	Erosión de depósitos naturales; escurrimiento de residuos de producción de vidrio y productos electrónicos.
Cadmio	0.005	0.005	Daños renales.	Corrosión de tuberías galvanizadas; erosión de depósitos naturales; vertidos de refinerías de metales; escurrimiento de baterías y pinturas usadas.
Cromo	0.100	0.025	Dermatitis alérgica.	Descargas de fábricas de acero y celulosa; erosión de depósitos naturales.
Cobre	0.013	0.002	Daños hepáticos y/o renales.	Corrosión de sistemas de plomería domésticos; erosión de depósitos naturales.
Plomo	0.015	0.005	Bebés y niños: Retrasos en el desarrollo físico o mental.	Corrosión de sistemas de plomería domésticos; erosión de depósitos naturales.
Mercurio	0.002	0.001	Daños renales.	Erosión de depósitos naturales; descargas de refinerías y fábricas; escurrimiento de vertederos y tierras de cultivo.

propuestas para darles un tratamiento para reducir su efecto en el ambiente, reutilizarlos como materia prima o emplearlos como fuentes de componentes de interés.

Los residuos agrícolas (hojas, tallos, granos, etc.) tienen alto contenido en material sólido que pueden tratarse como emplearse en la alimentación animal o como materia orgánica de compostaje. Además, se ha reportado que los residuos de proceso (bagazo, semillas, cáscaras, etc.) son fuentes importantes de compuestos con interés comercial (compuestos bioactivos) debido a su com-

posición química y propiedades bioactivas y funcionales (Díaz, 2022).

Recientemente, se han propuesto materiales obtenidos de los residuos agrícolas como adsorbentes económicos y respetuosos con el medio ambiente (Ince & Kaplan, 2020). Los materiales de origen agrícolas, en particular contienen celulosa han mostrado un alto potencial para la eliminación de los metales tóxico (Ranjan *et al.*, 2009). El proceso de adsorción de metales tóxicos en solución acuosa por los adsorbentes de bajo coste procedentes de residuos vegetales puede llevarse

a cabo con o sin modificaciones químicas. En general, los residuos vegetales tienen mayor capacidad de adsorción que las formas no modificadas (Boeykens *et al.*, 2018). Se ha reportado que varios grupos funcionales presentes en la pared celular de los residuos agrícolas son responsables a ciertas fuerzas de atracción para los iones metálicos y pro-

porcionan una alta eficiencia para su eliminación (Vasić *et al.*, 2023). El objetivo de este trabajo fue valorar el potencial de los residuos agrícolas en la remoción de metales pesados como contaminantes del agua contribuyendo así a un problema ambiental de gran preocupación.

Métodos y técnicas de investigación

Las técnicas y métodos de investigación nos ayudan a conocer de manera cualitativa y cuantitativa cómo está conformado el biosorbente para poder predecir la tasa de adsorción e identificar los mecanismos subyacentes a la adsorción. En la tabla 2, se enlistan los fundamentos, ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de eliminación de los iones metálicos disueltos en agua.

Biosorción

Se puede definir la biosorción como un proceso fisicoquímico en donde los iones metálicos se unen a la superficie de materiales derivados de origen biológico denominados biomasa o biosorbentes. Hay dos tipos de biomasa, la biomasa viva como los hongos, algas, bacterias y la biomasa muerta como los residuos agrícolas. El uso de biomasa muerta se aplica frecuentemente en el proceso de biosorción, ya que no requiere condiciones de mantenimiento. Si bien el uso de biomasa viva requiere nutrientes y es probable que la toxicidad de la biomasa ocurra al entrar en contacto con contaminantes, sin embargo, se puede reconocer su potencial en la eliminación de contaminantes a través de la bioprecipitación (Vasić *et al.*, 2023).

Mecanismo de biosorción

El proceso de adsorción depende de la naturaleza, tipos y características del adsorbente y del adsorbato. Entre las características del adsorbato a considerar para que se pueda llevar a cabo una adsorción eficaz, destacan el peso molecular, la estructura, el tamaño, la carga y la concentración de la solución (Gouda & Taha, 2023). Mientras que algunas de las características importantes del adsorbente son el tamaño de las partículas, el área superficial, la carga superficial, la accesibilidad de los poros, la difusión intrapartícula, y los grupos funcionales de la superficie (Madeña & Skuza, 2021). Además de estas características adsorbente-adsorbato, muchos parámetros fisicoquímicos del proceso, como la concentración inicial de iones metálicos, la dosis de adsorbente, el tiempo de contacto, el pH de la solución y la temperatura, afectan significativamente el proceso de adsorción ya que pueden mejorar o debilitar la eficiencia de eliminación al afectar también la solubilidad de los iones metálicos, la cinética y comportamiento isotérmico (Aguilar *et al.*, 2022). Hay tres pasos principales involucrados en el interfaz sólido/líquido del proceso de adsorción (para sistemas poro-

Tabla 2. Técnicas de eliminación de metales pesados.

Técnica	Fundamentos	Ventajas	Desventajas	Referencias
Adsorción	Los iones metálicos de las aguas residuales se adhieren a la superficie de adsorbentes.	Bajos costos operativos, alta capacidad de eliminación, fácil de operar.	Dependen principalmente de los materiales adsorbentes, que en ocasiones son muy caros (carbono) y baja selectividad.	Alias <i>et al.</i> (2020) y Qasem <i>et al.</i> (2021)
Filtración y separación por membranas	Es un proceso de tamizado físico que elimina solutos según el tamaño de los poros de la membrana y el peso molecular de los solutos.	Bajo consumo de energía, alta eficiencia de eliminación, capacidad de recuperar y reutilizar el polímero, bajo costo de operación.	La elección de macroligandos poliméricos solubles en agua apropiados.	Qasem <i>et al.</i> (2021) y Wenten <i>et al.</i> (2020)
Precipitación química	Se basa en producir metal insoluble mediante la reacción de metales disueltos en la solución y precipitante.	Económico y simple.	Dosis alta para obtener un pH óptimo, formación de grandes volúmenes de lodo.	Qasem <i>et al.</i> (2021) y Amuda <i>et al.</i> (2007)
Coagulación y precipitación	Es la desestabilización de los coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados.	Alta eficiencia de eliminación.	Toxicidad y peligrosidad para la salud de los coagulantes inorgánicos, un gran volumen de lodos, selectivos para algunos metales e ineficaces en contaminantes emergentes.	Qasem <i>et al.</i> (2021) y Amuda <i>et al.</i> (2007)
Flotación	Se añaden productos químicos, que se unen con iones metálicos, los aglomerados de menor densidad flotan y se eliminan de la parte superior de la columna de tratamiento.	Operación rápida, proceso compacto y costo moderado.	Si se usan tensioactivos químicos sintéticos presentan un elevado costo y toxicidad. Mientras que los biosurfactantes presentan bajas tasas de eliminación, grandes cantidades de dosificación y un proceso prolongado.	Qasem <i>et al.</i> (2021) y Ince & Kaplan (2020)
Electroquímico	Las reacciones químicas conducen a la purificación del agua mediante la eliminación de metales.	Alta sensibilidad de detección, instrumentación de bajo costo y su alta capacidad de detectar con precisión iones de metales pesados.	Alto consumo energético.	Alias <i>et al.</i> (2020) y Qasem <i>et al.</i> (2021)
Intercambio iónico	Un ion de metal pesado se elimina de una solución de aguas residuales uniéndolo a una fase sólida inmóvil.	Uso de materiales de bajo costo y operaciones convenientes. Eficiente para el tratamiento de aguas con baja concentración de metales pesados.	Necesita más investigación sobre estabilidad y reutilización.	(Qasem <i>et al.</i> 2021) y (Wan Nghah & Hanafiah, 2008)
Fotocatálisis	Proceso sencillo para el tratamiento de aguas residuales que utiliza luz y semiconductores.	Muestra la generación in situ de radicales reactivos, no utiliza productos químicos, no produce lodos.	Todavía es a escala de laboratorio, de bajo rendimiento, dependiente del pH e ineficaz cuando hay diferentes metales presentes.	(Alias <i>et al.</i> 2020) y (Qasem <i>et al.</i> 2021)

tos). Estos pasos mecánicos son los siguientes: (a) difusión del adsorbato desde la fase acuosa en masa hasta la superficie del adsorbente mediante difusión de película; (b) la adsorción en los medios de interfaz sólido/líquido en los sitios activos de la superficie adsorbente; y luego (c) la difusión interna de las moléculas de soluto dentro del adsorbente sólido mediante difusión por poros o difusión superficial, o ambas. En términos simples, la adsorción de iones de metales pesados en fase acuosa implica una fase adsorbente sólida y una fase de solvente líquido, en donde los iones metálicos están en las moléculas de adsorbato de soluto disueltas y, por lo tanto, son parte del proceso de separación de adsorción interface sólido/líquido (Sen, 2023). Los métodos de adsorción han atraído un gran interés durante los últimos años. El proceso de biosorción es una combinación de varios mecanismos que incluyen atracción electrostática, complejación, intercambio iónico, unión covalente, atracción de Van der Waals, adsorción y micro precipitación (Gouda & Taha, 2023). Hay dos tipos de adsorción: adsorción física y quimisorción. La adsorción física se produce debido a las débiles fuerzas de atracción de Van der Waals; este fenómeno disminuye con el aumento de la temperatura y generalmente tiene lugar a una temperatura más baja, muy por debajo del punto de ebullición del adsorbato. Mientras que la quimisorción es el resultado de un enlace químico relativamente fuerte entre los adsorbatos y los grupos funcionales de la superficie del adsorbente. Aquí sólo tiene lugar la formación de una única capa del adsorbato sobre el adsorbente y tiene una alta entalpía de adsorción. Se observa que primero un aumento y luego una

disminución de la entalpía de adsorción con el aumento de temperatura (Madelä & Skuza, 2021) y (Asemave *et al.*, 2021).

Modelos cinéticos e isotermas de biosorción

Para predecir la tasa de adsorción e identificar los mecanismos subyacentes a la adsorción y la capacidad del adsorbente, es vital comprender los diversos modelos cinéticos de adsorción y ecuaciones de modelos isotérmicos reportados. En términos del diseño del proceso de adsorción, la determinación de varios parámetros cinéticos representa un parámetro de diseño particularmente crítico. Varios investigadores han informado y aplicado a resultados experimentales de adsorción por lotes numerosos modelos cinéticos, como los modelos cinéticos reversibles o irreversibles de primer y segundo orden, junto con los modelos de adsorción de pseudo-primer o pseudo-segundo orden (Aguilar *et al.*, 2022) y (Sen, 2023).

Los modelos cinéticos más reportados (tabla 3) son los modelos cinéticos de pseudo-primer orden (PPO) y pseudo-segundo orden (PSO), en los que se ajustan datos experimentales por lotes a estos modelos y ofrecen información sobre la tasa de absorción del metal que, junto con los parámetros hidrodinámicos, son muy importantes para el diseño del proceso de bioadsorción (Wang & Chen, 2009). El modelo PPO puede describir condiciones en las que el número de sitios activos es significativamente menor que el número de adsorbatos ya que sólo se cumple bajo las siguientes condiciones: (a) una alta concentración inicial de adsorbato; (b) la etapa inicial del proceso de adsorción; y (c) un número limitado de sitios activos

Tabla 3. Ecuaciones de los modelos cinéticos de primer y pseudo-segundo orden.			
Modelo cinético	Ecuación diferencial	Nomenclatura	Referencia
PPO	$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$	q_t es la cantidad de contaminante adsorbido en el momento t (mg g^{-1}); k_1 es la constante de velocidad; q_e es la cantidad de soluto adsorbido en equilibrio (mg g^{-1}).	Wang & Chen (2009)
PSO	$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$	k_2 es la constante de velocidad de bioadsorción de segundo orden.	Ho & McKay (1999)

en los adsorbentes. Mientras que el modelo pso es el más utilizado y se puede utilizar en condiciones donde el número de sitios activos tiene el mismo orden de magnitud que el número de adsorbatos. Así, el modelo pso se cumple en tres condiciones: (a) una baja concentración inicial de adsorbato; (b) la etapa final del proceso de adsorción; y (c) abundantes sitios activos (Sen, 2023).

El estudio de la cinética de biosorción de metales pesados es importante para determinar el tiempo de equilibrio requerido del proceso y obtener información sobre los mecanismos de adsorción y los pasos que determinan la velocidad. La determinación de la tasa de biosorción puede contribuir a la predicción del tiempo de residencia del adsorbato en la interfaz sólido-solución, ayudando a diseñar el proceso apropiado de tratamiento de agua o aguas residuales (Asemave *et al.*, 2021). Por otro lado, los estudios de isothermas de adsorción son cruciales para comprender los mecanismos de adsorción (monocapa/multicapa), la energía y la capacidad máxima de adsorción del adsorbente en experimentos de contacto por lotes en equilibrio bajo las mismas condiciones ambientales (por ejemplo, pH, temperatura, fuerza iónica).

Los datos experimentales de equilibrio del proceso de absorción de metal no concuerdan solo con un modelo isotérmico, por lo tanto, explicar el proceso de purificación de un sistema con más de una ecuación matemática reflejaría resultados reales (Tekin & Acikel, 2023). Las isothermas de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, son las más comunes ecuaciones matemáticas (tabla 4) que explican el fenómeno de absorción de metal en los sistemas de un solo metal (Aguilar *et al.*, 2022), (Sen, 2023) y (Langmuir, 1918).

Residuos agrícolas mexicanos como biosorbentes

Dada la diversidad de climas, tipos de suelos y ecosistemas a lo largo del territorio mexicano, es posible encontrar condiciones ideales para el cultivo de una variedad de productos agrícolas. Según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), México ocupa el puesto 12 a nivel mundial en producción de alimentos, con 818 productos agroalimentarios, de los cuales 71 ocupan el primer lugar por volumen de producción (SIAP, 2023). Además, se considera como uno de los principales países exportadores de frutas a nivel mundial (Agropecuaria *et al.*, 2020).

Tabla 4. Modelos de isotermas de biosorción.			
Isoterma	Ecuación no lineal	Nomenclatura	Referencia
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$	q_e es la capacidad de sorción de metales en equilibrio; C_e es la concentración de soluto en equilibrio en solución; q_{max} capacidad máxima de sorción y b constante de Langmuir.	Wang & Chen (2009)
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	K_F es una constante de equilibrio de biosorción, representativa de la capacidad de sorción; y n es una constante indicativa de la intensidad de la biosorción.	Wang & Guo (2023)
Langmuir–Freundlich	$q_e = \frac{q_{max} b C_e^{1/n}}{1 + b C_e^{1/n}}$	Supone que la superficie es homogénea, pero que la sorción es un proceso cooperativo debido a las interacciones adsorbato-adsorbato.	Sips (1950)
Redlich–Peterson	$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a_{RP} C_e^\beta}$	K_{RP} , a_{RP} y β son los parámetros de Redlich–Peterson. El exponente β se encuentra entre 0 y 1. Para $\beta=1$, el modelo se convierte a la forma Langmuir.	Redlich & Peterson (2007)

El Grupo Consultor de Mercados Agrícolas 2024, señala que, en el 2024, México producirá un total de 113.5 millones de toneladas de productos agroalimentarios, lo que implicará un crecimiento anual de 1.7 por ciento, y dejará en décimo lugar a Canadá, con 109.5 millones de toneladas.

Agave tequilero

El agave tequilero, también conocido como *Agave tequilana* Weber, es una planta suculenta nativa de México distribuid en Jalisco principalmente en los municipios de Tequila, Amacitan y otras áreas cercanas que tiene propiedades únicas para la remoción de metales pesados. Esta planta presenta hojas grandes y carnudas que contienen compuestos bioactivos capaces de adsorber metales pesados presentes en diferentes medios (Chit, 2020). El agave tequilero tiene propiedades que podrían ser útiles para eliminar contaminantes del agua o del aire. Su alta capacidad de adsorción y su estructura porosa permiten que se adhieran a su superficie metales como plomo, cadmio, mercu-

rio y arsénico, entre otros. Además, el agave tequilero es resistente a condiciones ambientales adversas y puede crecer en suelos contaminados, lo que lo convierte en una opción viable para la remediación de sitios contaminados. Las propiedades del agave tequilero lo convierten en una alternativa natural y sostenible para el tratamiento de aguas y suelos contaminados con metales pesados (Avila, 2011).

Aguacate

El aguacate (*Persea americana*), también conocido como palta es un árbol con fruto comestible que pertenece a la familia *Lauraceae*, una de las más antiguas entre las plantas con flores, y su fruto es uno de los más nutritivos entre todas las frutas comerciales. En esta familia se incluyen alrededor de 3,000 especies, principalmente arbóreas de regiones tropicales y subtropicales. Es utilizado tanto para obtener aceite como en la industria de los cosméticos (Hernández *et al.*, 2020). Es uno de los productos con mayor exportación agroalimentaria nacional. México es

el principal proveedor con un 45.95 % del valor de las exportaciones mundiales (SIAP, 2023). De hecho, México destaca como el mayor exportador de aguacate en el mundo. En el año 2021, se exportaron más de 1.4 millones de toneladas de aguacate, con un valor de 3,546 millones de dólares. Existen 10 estados potencialmente productores del aguacate en México entre los que destacan Michoacán, Jalisco y México.

Cacao

El cacao contiene varios compuestos que podrían actuar como sitios de adsorción para los metales. Por ejemplo, los polifenoles, que son compuestos antioxidantes presentes en el cacao, han mostrado capacidad para adsorber metales pesados. Además, la presencia de grupos funcionales como hidroxilos y carboxilos en las moléculas de los polifenoles podría interactuar con los metales, facilitando su adsorción (Casteblanco, 2018). El trópico mexicano presenta condiciones agroecológicas apropiadas para el desarrollo del cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.), especie distribuida en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas, en México (Espinoza *et al.*, 2015).

Café

El café contiene una variedad de compuestos químicos que pueden actuar como sitios de adsorción para los metales. Los compuestos fenólicos, como el ácido clorogénico, son abundantes en el café y tienen propiedades antioxidantes que les permiten interactuar con los metales. Además, el café contiene otros compuestos orgánicos, como ácidos orgánicos y polisacáridos, que también pueden participar en la adsorción de metales. La capacidad de adsorción del café para los me-

tales puede variar dependiendo de factores como el tipo de café, el grado de tostado y la preparación. Algunos estudios han investigado el uso de posos de café como adsorbentes para la remoción de metales pesados en aguas residuales, y han encontrado resultados prometedores (Carvajal & Marulanda, 2022).

Al igual que con el cacao, la adsorción de metales con café tiene el potencial de tener diversas aplicaciones en la remoción de contaminantes, la purificación de productos y la recuperación de metales valiosos. Los estados con mayor producción del café en México son Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Puebla, Tabasco, Jalisco, Nayarit, Hidalgo y San Luis Potosí.

Pitahaya

La pitaya, conocida como la fruta del dragón, crece en ambientes tropicales. Algunas especies han demostrado ser aptas para su comercialización, dentro de las que se distinguen *Hylocereus undatus* (cáscara roja, pulpa blanca), *H. polyrhizus* (cáscara y pulpa rojas) cultivada principalmente en Israel, *H. costaricensis* (cáscara roja y pulpa roja) (Cruz *et al.*, 2015). La pitahaya en México crece desde los 0 a más de 1,800 msnm, en áreas con precipitaciones que van desde los 400 a más de 2 000 mm anuales. Su periodo reproductivo está comprendido entre los meses de mayo a septiembre; sin embargo, es posible tener una mínima producción de fruta en áreas más tropicales hasta el mes de noviembre. En el país se presenta una gran gama de climas y tipos de *Hylocereus* que favorecen la producción en áreas extensas de frutas de calidad para el mercado nacional e internacional. México cuenta con los recursos genéticos y naturales necesarios para

la producción y manejo que permitan su explotación a nivel comercial por su área extensa de cultivo ya que es adaptable tanto como a climas cálidos húmedos como climas

con poca humedad. La mitad de la superficie y del volumen de la producción corresponde a la península de Yucatán (Georgin *et al.*, 2022).

Resultados y discusión

El desarrollo de métodos de remediación de bajo impacto ambiental que permitan la eliminación o recuperación de metales pesados tienen un valor crucial. En particular, el tratamiento de metales pesados en aguas residuales mediante adsorción está avanzando a través de investigaciones enfocadas al desarrollo de materiales altamente eficientes, con adsorbentes de bajo costo y amigables con el medio ambiente. Por lo tanto, los residuos agrícolas, dada su eficiencia, disponibilidad y accesibilidad, podrían convertirse en material útil que actúe como un biosorbente eficaz (Cruz *et al.*, 2022). En este sentido, el uso de residuos agrícolas como bioadsorbentes, resulta ecológico e innovador, por lo que es el mejor ejemplo de gestión sostenible de residuos. Por ejemplo, las ventajas de este proceso son el hecho de que no es necesario producir biomasa específicamente para ese fin ya que son subproductos agrícolas o madereros, disponibles en grandes cantidades; su operación simple; muestran una alta eficiencia a menores concentraciones de contaminantes; tienen una alta selectividad a nivel molecular; presentan un bajo consumo de energía; no hay necesidad de usar nutrientes adicionales; tienen un bajo costo operativo; presentan una alta eficiencia de separación; la capacidad de separar múltiples componentes contaminantes con mínima contaminación secundaria y sin aumen-

to en la demanda química de oxígeno (DQO) de agua; y sobre todo, la regeneración de biosorbente. Todas estas ventajas lo convierten en método sostenible (Yaro *et al.*, 2018). Existen muchos residuos agroindustriales con potencial como bioadsorbentes que ya han sido probados para determinar su aplicación en procesos de adsorción. Estos materiales deben tener, entre otras características, alta área de superficie, selectividad, capacidad de sorción y compatibilidad con el contaminante y el proceso. Entre ellos, los biomateriales celulósicos tienen una capacidad máxima de sorción debido a la disponibilidad de grupos funcionales hidroxilo (OH^-) activos (Vasić *et al.*, 2023). Los residuos agrícolas se pueden generar a partir de varias partes de las plantas, como tallos, hojas, flores, frutos, cáscaras, semillas y huesos de frutos, por ejemplo: bagazo de caña de azúcar, cáscara de coco, aceite de palma, corteza de neem, residuos de nueces y nueces, por- productos como piel de cebolla, cáscara de palmiste, salvado de arroz y trigo, levadura de cerveza y aserrín. Debido a su estructura formada por biopolímeros naturales (celulosa), todos estos residuos, heteropolisacáridos como hemicelulosa, pectina y lignina, además de tener grupos fenólicos, amino, hidroxilo y carboxilo, proteínas de almidón, hidrocarburos, lípidos, cenizas de almidón, pueden convertirlos en exitosos

adsorbentes de eliminar metales pesados (Gouda & Taha, 2023). Los principales mecanismos conocidos para la adsorción de metales y colorantes en bioadsorbentes celulósicos son la quelación, el intercambio iónico y la formación de complejón con grupos funcionales y la liberación de $[H_3O^+]$ en una solución acuosa (Abdolali *et al*, 2014).

Los materiales adsorbentes de residuos sólidos agrícolas requieren operaciones mínimas de pretratamiento, como lavado, secado, molienda o tratamientos químicos menores. En este sentido, los residuos sólidos agrícolas modificados químicamente utilizando ácidos como el clorhídrico, fosfórico, sulfúrico y cítrico; soluciones alcalinas como el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, cloruro de zinc, cloruro de calcio y amoníaco; agentes oxidantes como el permanganato de potasio; sales inorgánicas como los cloruros de sodio, magnesio, calcio y agentes/detergentes orgánicos como tensioactivos aniónicos, formaldehído y glutamato monosódico, han sido ampliamente utilizados como adsorbentes eficaces en la eliminación de diversos contaminantes de aguas residuales debido al bajo costo y la facilidad del procedimiento, proceso

de un solo paso en la mayoría de los casos (Madeła & Skuza, 2021) y (Anastopoulos *et al.*, 2018).

La modificación química elimina grasas naturales, ceras y compuestos de lignina de bajo peso molecular, pero, sobre todo incrementa el número de grupos funcionales de las superficies de adsorbentes agrícolas, además de mejorar la heterogeneidad química de la superficie y/o alterar la morfología de la superficie (Sen, 2023) y (Anastopoulos *et al*, 2018). (tabla 5).

En resumen, la diversidad climática y geográfica del país permite la producción de una amplia variedad de cultivos, lo que genera una gran cantidad de residuos agrícolas. Sin embargo, en los últimos años, ha habido un aumento en la conciencia ambiental en México, lo que ha llevado a mayor interés en encontrar formas de aprovechar los residuos agrícolas de manera sostenible. Como por ejemplo utilizarlos como biosorbentes para darles un valor agregado y promover prácticas más sostenibles en el sector agrícola. Entre los materiales orgánicos con mayor potencial y que pueden ser empleados para la remoción de contaminantes son los que se enlistan en la tabla 6.

Conclusiones

El uso de residuos agrícolas como adsorbentes para remover metales pesados y otros contaminantes no solo tiene un impacto positivo en la protección del medio ambiente y la salud pública, sino que también puede contribuir al desarrollo económico y social del país. Al utilizar este tipo de residuos como bioadsorbentes puede contribuir sig-

nificativamente a la remediación de suelos y aguas contaminadas. Estos bioadsorbentes, pueden adsorber metales pesados como el plomo, el cadmio, el arsénico, entre otros, reduciendo así su presencia en el medio ambiente y protegiendo la salud humana y la biodiversidad. Además, el empleo de estos residuos como bioadsorbentes proporciona

Tabla 5. Algunos residuos agrícolas utilizados para eliminar metales pesados del agua.					
Biosorbente	Metal	Tipo de Isoterma	Modelo Cinético	Qm (mg g ⁻¹)	Referencias
Semillas de Tamarindo	Pb(II)	Langmuir	PFO	16	Jayasree <i>et al.</i> (2021)
Semillas de Tamarindo (H ₂ SO ₄)	Pb(II)	Langmuir	PFO	18.34	Jayasree <i>et al.</i> (2021)
Cáscara de arroz	Cd(II)	Langmuir	PSO	8.58	Kumar & Bandyopadhyay (2006)
Cáscara de arroz (NaOH)	Cd(II)	Langmuir	PSO	20.24	Kumar & Bandyopadhyay (2006)
Cáscara de arroz (Na ₂ CO ₃)	Cd(II)	Langmuir	PSO	16.18	Kumar & Bandyopadhyay (2006)
Hojas muertas de <i>Posidonia oceanica</i>	Cd(II)	Redlich-Peterson	PFO	0.69 (mmol g ⁻¹)	Jayasree <i>et al.</i> (2021)
Hojas muertas de <i>Posidonia oceanica</i> (HCHO)	Cd(II)	Redlich-Peterson	PFO	0.82 (mmol g ⁻¹)	Jayasree <i>et al.</i> (2021)
Hojas de <i>Posidonia oceanica</i> (HCl)	Cd(II)	Redlich-Peterson	PFO	1.11 (mmol g ⁻¹)	Jayasree <i>et al.</i> (2021)
Bagazo de <i>Agave salmiana</i>	Pb(II)	Langmuir	-	35.6	Velazquez-Jimenez <i>et al.</i> (2013)
Bagazo de <i>Agave salmiana</i> (HCl)	Pb(II)	Langmuir	-	42.31	Velazquez-Jimenez <i>et al.</i> (2013)
Bagazo de <i>Agave salmiana</i> (HNO ₃)	Pb(II)	Langmuir	-	54.29	Velazquez-Jimenez <i>et al.</i> (2013)
Bagazo de <i>Agave salmiana</i> (NaOH)	Pb(II)	Langmuir	-	50.12	Velazquez-Jimenez <i>et al.</i> (2013)
Corteza de <i>Eucalyptus sheathiana</i>	Zn(II)	Freundlich y Langmuir	PSO	128.21	Chen <i>et al.</i> (2019)
Corteza de <i>Eucalyptus sheathiana</i> (NaOH)	Zn(II)	Freundlich y Langmuir	PSO	250	Chen <i>et al.</i> (2019)

Tabla 6. Materiales biosorbentes y su capacidad de adsorción.				
Material	Metales Pesados	Capacidad de Adsorción	Porcentaje de Remoción	Referencias
Aguacate	Cadmio, Plomo, Cromo,	Moderada a Alta	60-90%	De (2023) Hernández López <i>et al.</i> (2020)
Cacao	Cromo	Moderada a Alta	50-80%	Espinosa <i>et al.</i> (2015).
Café	Cadmio, Plomo, Cobre	Moderada a Alta	40-70%	Carvajal & Marulanda (2022)
Caña de Azúcar	Níquel, Cromo	Moderada a Alta	50-80%	Alom <i>et al.</i> (n.d.)
Mango	Cromo	Baja a Moderada	30-50%	Muño <i>et al.</i> (2009)
Agave Tequilero	Cadmio, Plomo, Cobre, Zinc, Níquel	Moderada a Alta	50-90%	Acevedo (2020)

una alternativa sostenible que reduce la contaminación del aire, el suelo y el agua.

Finalmente, la valorización de los residuos agrícolas como bioadsorbentes puede brindar beneficios económicos adicionales a los agricultores. En lugar de desechar los residuos, pueden venderlos o utilizarlos para producir bioadsorbentes, lo que les proporciona una fuente adicional de ingresos. También, se puede contribuir al desarrollo rural,

ya que la investigación e implementación de proyectos para utilizar residuos agrícolas como bioadsorbentes puede fomentar el desarrollo rural al promover la creación de empleo en las comunidades agrícolas. Esto puede incluir la capacitación de personas en técnicas de producción de este tipo de materiales, el establecimiento de pequeñas empresas locales y la generación de oportunidades de empleo en la cadena de suministro.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por su apoyo para realizar este proyec-

to, a la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), al Laboratorio de Materiales Avanzados a cargo del Dr. Mohamed Abatal.

Literatura citada

- Abdolali, A., Guo, W. S., Ngo, H. H., Chen, S. S., Nguyen, N. C., & Tung, K. L. (2014). Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 57–66.
- Acevedo, V. del M. M. (2020). Remoción de plomo y cadmio mediante fibras de agave angustifolia y un consorcio bacteriano como una alternativa de biorremediación. Tesis de licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del estado de Morelos.
- Acharya, J., Kumar, U., & Mahammed Rafi, P. (2018). Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater by Chemically Modified Agricultural Waste Material as Potential Adsorbent: A Review. 526| International Journal of Current Engineering and Technology, 8(3), 526–530.
- Agropecuaria, E. I., Agr, E. I., Ganadera, E. I., Importaciones, E., Exportaciones, P., Agroindustrial, I., & Importaciones, E. (2020). Balanza Comercial Agroalimentaria de México Balanza de comercio exterior agropecuaria y agroindustrial de México Miles de dólares Exportaciones agropecuarias y agroindustriales de México Miles de dólares Ene-Sep Ene-Sep. 1–3.
- Aguilar-Rosero, J., Urbina-López, M. E., Rodríguez-González, B. E., León-Villegas, S. X., Luna-Cruz, I. E., & Cárdenas-Chávez, D. L. (2022). Development and Characterization of Bioadsorbents Derived from Different Agricultural Wastes for Water Reclamation: A Review. *Applied Sciences* (Switzerland), 12(5).

- Alias, N., Rosli, S. A., Sazalli, N. A. H., Hamid, H. A., Arivalakan, S., Umar, S. N. H., Khim, B. K., Taib, B. N., Keat, Y. K., Razak, K. A., Yee, Y. F., Hussain, Z., Bakar, E. A., Kamaruddin, N. F., Manaf, A. A., Uchiyama, N., Kian, T. W., Matsuda, A., Kawamura, G., Lockman, Z. (2020). Metal oxide for heavy metal detection and removal. *Metal Oxide Powder Technologies: Fundamentals, Processing Methods and Applications*, 299–332.
- Alom, C., Curbelo, A., Villas, L., & Cort, M. (n.d.). Remoción de cromo y níquel de soluciones acuosas utilizando bagazo de caña de azúcar. 1–7.
- Amuda, O. S., Giwa, A. A., & Bello, I. A. (2007). Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. *Biochemical Engineering Journal*, 36(2), 174–181.
- Anastopoulos, I., Robalds, A., Tran, H., Mitrogiannis, D., Giannakoudakis, D. A., Hosseini-Bandegharai, A., & Dotto, G. (2018). Removal of heavy metals by leaves-derived biosorbents. *Environmental Chemistry Letters*, 17.
- Asemave, K., Thaddeus, L., & Tarhemba, P. T. (2021). Lignocellulosic-Based Sorbents: A Review. *Sustainable Chemistry*, 2(2), 271–285.
- Avila, C. (2011). Remocion de azul de metileno en agua empleando bagazo de agave salmiana como biosorbente (pp. 1–99). Tesis de maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Boeykens, S. P., Saralegui, A., Caracciolo, N., & Piol, M. N. (2018). Agroindustrial waste for lead and chromium biosorption. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6(2), 341–350.
- Carvajal Florez, E., & Marulanda, L. F. (2022). Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales. *Ingenierías USBMed*, 11(1), 44–55.
- Casteblanco, J. A. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *La Granja*, 27(1), 21–35.
- Chen, Y., Zhu, Q., Dong, X., Huang, W., Du, C., & Lu, D. (2019). How Serratia marcescens HB-4 absorbs cadmium and its implication on phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 185, 109723.
- Chit, P. (2020). Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija. Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del estado de Morelos.
- Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos (2023). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- Cruz, J., Rodríguez, L., Ortiz, R., Fonseca, M., & Ruíz, G. (2015). Pitahaya (*Hylocereus* spp.) Un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano. *Cultivos Tropicales*, 36, 67–76.
- Cruz, L., Macena, M., Esteves, B., & Santos, I. (2022). Lignocellulosic Materials Used as Biosorbents for the Capture of Nickel (II) in Aqueous Solution. *Applied Sciences* (Switzerland), 12(2).
- Díaz, E. (2022). Residuos Agroalimentarios. ¿Qué son? ¿Quién los genera? Y ¿Por qué son valiosos? *Frontera Biotecnológica*, 9-16.
- EPA, U. S. (2009). National Primary Drinking Water Guidelines. EPA 816-F-09-004, 1, United States Environmental Protection Agency.
- Espinosa, J., Uresti, J., Vélez, A., Moctezuma, G., Inurreta, H., & Góngora, S. (2015). Productividad y rentabilidad del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1052.
- García, A., Carrington, P., Rowley-Neale, S. J., & Banks, C. E. (2020). Recent advances in portable heavy metal electrochemical sensing platforms. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(10), 2676–2690.

- Georgin, J., da Boit Martinello, K., Franco, D. S. P., Netto, M. S., Piccilli, D. G. A., Yilmaz, M., Silva, L. F. O., & Dotto, G. L. (2022). Residual peel of pitaya fruit (*Hylocereus undatus*) as a precursor to obtaining an efficient carbon-based adsorbent for the removal of metanil yellow dye from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1).
- Gómez, L., Rodríguez, P., & Salcedo, J. (2022). Fruit Peels as a Sustainable Waste for the Biosorption of Heavy Metals in Wastewater: A Review. *Molecules*, 27(7).
- Gouda, A., & Taha, A. (2023). Biosorption of Heavy Metals as a New Alternative Method for Wastewater Treatment: A Review. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 27(2), 135–153.
- Hernández, V., Nájera, M., Cárdenas, F., Martínez, V., & Acosta, I. (2020). Utilidad de la cáscara de aguacate (*Persea americana*) para la eliminación de cromo (VI) de aguas contaminadas. *Transversalidad Científica y Tecnológica*, 4(1), 110–117.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465.
- Ince, M., & Kaplan Ince, O. (2020). Heavy Metal Removal Techniques Using Response Surface Methodology: Water/Wastewater Treatment. *Biochemical Toxicology - Heavy Metals and Nanomaterials*, 1–19.
- Jayasree, R., Kumar, P., Saravanan, A., Hemavathy, R., Yaashikaa, P., Arthi, P., Shreshtha, J., Jeevanantham, S., Karishma, S., Arasu, M., Al-Dhabi, N., & Choi, K. (2021). Sequestration of toxic Pb (II) ions using ultrasonic modified agro waste: Adsorption mechanism and modelling study. *Chemosphere*, 285, 131502.
- Kumar, U., & Bandyopadhyay, M. (2006). Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk. *Bioresource Technology*, 97(1), 104–109.
- Langmuir, I. (1918). Adsorption of gases on glass, mica and platinum. 1361(2).
- Madela, M., & Skuza, M. (2021). Towards a circular economy: Analysis of the use of biowaste as biosorbent for the removal of heavy metals. *Energies*, 14(17).
- Muño, N., Urbina, C., & Urbinal, C. (2009). Uso de la Semilla de Mango variedad Haden para la remoción de Cromo Hexavalente de soluciones acuosas. *Revista Cubana de Química*, XX(3), 91–98.
- Qasem, A., Mohammed, H., & Lawal, U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4(1).
- Quintera, S., Zwolinski P., Evrard D., Cano, J. & Rivas, P. (2023). Turning food loss and waste into animal feed: A Mexican spatial inventory of potential generation of agro-industrial wastes for livestock feed. *Sustainable Production and Consumption*. 41, 36–48.
- R, Yaro, J. a, Yamauchi, F., Larson, D. F., Work, S. F. O. R., Work, D., Wolseth, J., Wiuf, C., Donnelly, P., Wilson, J., Wilson, J., Wilson-Parr, R., Westminster, N., Plc, B., No, W., Office, R., Authority, P. R., Authority, F. C., Authority, P. R., Marchetti, A. (2018). Biosorción de cromo VI en soluciones acuosas con cascarilla de cacao modificada con ácido cítrico. *World Development*, 1(1), 1–15.
- Ranjan, D., Srivastava, P., Talat, M., & Hasan, S. H. (2009). Biosorption of Cr(VI) from water using biomass of *aeromonas hydrophila*: Central composite design for optimization of process variables. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 158(3), 524–539.
- Redlich, O., & Peterson, D. L. (2007). A Useful Adsorption Isotherm. *The Journal of Physical Chemistry*, 63.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (2016). Norma Mexicana. NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua. Medición de Metales por Absorción Atómica en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas. Método de Prueba.
- Sen, T. K. (2023). Agricultural Solid Wastes Based Adsorbent Materials in the Remediation

- of Heavy Metal Ions from Water and Wastewater by Adsorption: A Review. *Molecules*, 28(14).
- SIAP. (2023). Agricultura regenerativa, la vía para un futuro sustentable. Sistema de Información Agrícola y Pesquera (SIAP), 1, 220.
- Sips, R. (1950). On the Structure of a Catalyst Surface. II. *The Journal of Chemical Physics*, 18(8), 1024–1026.
- Tekin, B., & Acikel, U. (2023). Adsorption Isotherms for Removal of Heavy Metal Ions (Copper and Nickel) from Aqueous Solutions in Single and Binary Adsorption Processes. *Gazi University Journal of Science*, 36(2), 495–509.
- Vasić, V., Kukić, D., Šćiban, M., Đurišić-Mladenović, N., Velić, N., Pajin, B., Crespo, J., Farre, M., & Šereš, Z. (2023). Lignocellulose-Based Biosorbents for the Removal of Contaminants of Emerging Concern (CECs) from Water: A Review. *Water* (Switzerland), 15(10).
- Velazquez, L., Pavlick, A., & Rangel, J. (2013). Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. *Industrial Crops and Products*, 43(1), 200–206.
- Wan Ngah, W., & Hanafiah, M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 3935–3948.
- Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, 27(2), 195–226.
- Wang, J., & Guo, X. (2023). Adsorption kinetics and isotherm models of heavy metals by various adsorbents: An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(21), 1837–1865.
- Wenten, G., Khoiruddin, K., Wardani, K., & Widiassa, N. (2020). Synthetic polymer-based membranes for heavy metal removal. Synthetic Polymeric Membranes for Advanced Water Treatment, Gas Separation, and Energy Sustainability, 71–101.

