



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**



Instituto **Tecnológico**[®]
de Aguascalientes

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**“Síntesis de adsorbentes organometálicos para la
remoción de agentes tóxicos”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA

I.Q. Luis Eduardo Méndez Suárez

Directora de tesis:

Dra. Didilia Ileana Mendoza Castillo

Aguascalientes, Ags., Octubre de 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 19/agosto/2025
Oficio No. DEPI 560/2025
Asunto: Autorización impresión tesis

C. LUIS EDUARDO MÉNDEZ SUÁREZ
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos **constar** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: **"Síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de agentes tóxicos"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE

DRA. DIDILIA ILEANA MENDOZA CASTILLO

SECRETARIO

DRA. HILDA ELIZABETH REYNAL ÁVILA

VOCAL

DR. EDUARDO ENRIQUE MERODIO MORALES

ccp. Archivo
JFLH/yevo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Dirección

Aguascalientes, Ags., 26/octubre/2025

Asunto: Autorización de uso de derechos

Luis Eduardo Méndez Suárez, mayor de edad, con domicilio ubicado en Mar de Cortés #106 Fracc. Las brisas, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada "Síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de agentes tóxicos" quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrará por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada "Síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de agentes tóxicos", a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 115
e-mail: direccion@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
Dirección

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de EL AUTOR Y/O TITULAR, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA – AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia

Ing. Luis Eduardo Méndez Suárez
AUTOR DE LA TESIS

Vo.Bo.

Dra. Didilia Ileana Mendoza Castillo
DIRECTOR DE LA TESIS

e03f81ef-4d
f2-4060-98e
8-6fe97006
3f07

Firmado digitalmente por
e03f81ef-4df2-4060-98e8-6f
e970063f07
Nombre de reconocimiento
(DN):
cn=e03f81ef-4df2-4060-98e
8-6fe970063f07
Fecha: 2025.10.26
15:03:29 -06'00'

ccp. Archivo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 115
e-mail: direccion@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Aguascalientes, el (la) que suscribe Luis Eduardo Méndez Suárez estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Didilia Ileana Mendoza Castillo y cede los derechos del trabajo “Síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de agentes tóxicos”, al Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes para su difusión, con fines académicos y de investigación.

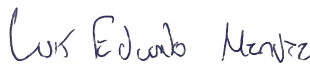
Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Luis Eduardo Méndez Suárez

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

En la Ciudad de Aguascalientes, el (la) que suscribe Luis Eduardo Méndez Suárez estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que se responsabiliza de la autenticidad y originalidad del presente trabajo “Síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de agentes tóxicos”, el cual ha sido presentado para la obtención del grado correspondiente.



Luis Eduardo Méndez Suárez

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

En la Ciudad de Aguascalientes, el que suscribe Luis Eduardo Méndez Suárez estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, adscrito al Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Aguascalientes, manifiesta que se responsabiliza de la autenticidad y originalidad del presente trabajo “Síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de agentes tóxicos”, el cual ha sido presentado para la obtención del grado correspondiente.



Luis Eduardo Méndez Suárez

Resumen

Se sintetizaron diferentes adsorbentes organometálicos a partir de tereftalato de polietileno (PET) y distintos residuos metálicos procedentes de la industria metalmecánica y de fundición tales como: agua de decapado de piezas de hierro, lodos generados en procesos de cromado, escorias de la fundición acero y hierro, chatarra de aluminio y hierro. Se hicieron estudios preliminares para evaluar el desempeño de adsorción de arsénico (As) y fluoruros (F) de los diferentes materiales, y las capacidades de adsorción oscilaron entre de 0 – 0.65 y 0 – 0.57 mmol/g, respectivamente. En forma específica destacó el adsorbente obtenido a partir de escoria de hierro (As: 0.65 mmol/g, F: 0.57 mmol/g). Se hicieron estudios de equilibrio de adsorción con este material a 30 y 40 °C empleando soluciones acuosas. Las capacidades de adsorción máximas a dichas temperaturas fueron de 0.62 y 0.67 mmol/g para arsénico y de 0.71 y 0.73 mmol/g para fluoruros. También se obtuvieron isotermas de adsorción a 30 °C usando agua potable enriquecida con dichos contaminantes, y se observó una reducción en la capacidad de adsorción debido a la presencia de otros iones. Los datos de equilibrio se correlacionaron con el modelo de monocapa con una energía de adsorción y los parámetros obtenidos indicaron una ocupación parcial de los sitios activos y que el adsorbente tiene mayor afinidad por los iones de fluoruro. Por otra parte, el adsorbente se caracterizó antes y después del proceso de adsorción empleando diferentes técnicas instrumentales. Los resultados de estos análisis indicaron la síntesis exitosa de adsorbentes organometálicos análogos pertenecientes a la familia de los MOF MIL-101(Fe), y la participación del nodo metálico en la adsorción de ambos contaminantes. Finalmente, el presente estudio evidencia el potencial de los residuos metálicos como materia prima alternativa, sostenible y de bajo costo para la síntesis de adsorbentes organometálicos.

Por: Ing. Luis Eduardo Méndez Suárez

Dirigido por: Dra. Didilia Ileana Mendoza Castillo

Índice.

Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos.	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos particulares.....	4
Capítulo II. Marco teórico.	5
Capítulo III. Metodología.	13
3.1 Materiales y reactivos.....	13
3.2 Síntesis de adsorbentes organometálicos empleando residuos metálicos y PET.....	13
3.3 Evaluación del desempeño de los adsorbentes organometálicos en la remoción de arsénico y fluoruros.	14
3.4 Caracterización fisicoquímica del adsorbente CFe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.	15
Capítulo IV. Resultados	19
4.1. Evaluación del desempeño de los adsorbentes organometálicos en la remoción de arsénico y fluoruros.	19
4.2 Caracterización fisicoquímica del adsorbente Fe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.	24
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	31
5.1. Conclusiones.	31
5.2. Recomendaciones.....	31
Bibliografía.....	32

Índice de Figuras

Figura 2.1. Zonas geográficas y distribución de algunos contaminantes geogénicos importantes encontrados en aguas.....	11
Figura 3.1 Representación esquemática de la síntesis de adsorbentes organometálicos a partir de residuos metálicos y PET.	14
Figura 3.2. Condiciones experimentales usadas en la remoción de arsénico y fluoruros empleando adsorbentes organometálicos sintetizados a partir de residuos metálicos y PET.	15
Figura 3.3. Equipos y condiciones de medición utilizadas para la caracterización del adsorbente CFe-DMF.	16
Figura 4.1. Capacidades de adsorción de arsénico y fluoruros de los adsorbentes organometálicos sintetizados a partir de residuos metálicos y PET.	19
Figura 4.2. Isotermas de adsorción de arsénico y fluoruros en solución acuosa y agua potable empleando el adsorbente CFe-DMF.....	21
Figura 4.3. Espectros de infrarrojo del adsorbente CFe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.....	25
Figura 4.4. Difractogramas de rayos X de la chatarra de hierro, y del adsorbente CFe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.	26
Figura 4.5. Micrografías electrónicas y análisis elemental de la chatarra de hierro, y del adsorbente organometálico antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.	27
Figura 4.6. Curvas TGA de la chatarra de hierro y del adsorbente organometálico antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.....	29

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Ejemplos de ligandos utilizados en la síntesis de materiales organometálicos.	6
Tabla 2.2. Ejemplos de aplicaciones de MOFs.....	7
Tabla 2.3. MOFs utilizados como adsorbentes de contaminantes orgánicos e inorgánicos.	8
Tabla 4.1. Análisis comparativo de capacidades máximas de adsorción máximas de arsénico y fluoruros para diferentes adsorbentes organometálicos.	23
Tabla 4.2. Parámetros obtenidos para la adsorción de arsénico y fluoruros empleando el modelo de adsorción monocapa con una energía de adsorción.....	24

Capítulo I. Introducción.

1.1 Antecedentes

Las estructuras organometálicas, conocidas como Metal-Organic Frameworks (MOFs, por sus siglas en inglés), son compuestos de coordinación con un alto grado de cristalinidad y porosidad. Estos materiales se obtienen mediante la unión química de un ligando y un nodo metálico en presencia de un disolvente orgánico como N,N-dietilformamida o N,N-dimetilformamida (DMF) (Kumar et al., 2020). Los nodos metálicos suelen estar constituidos por sales metálicas, mientras que los ligandos generalmente son compuestos orgánicos (principalmente ácidos carboxílicos) capaces de coordinarse con los iones metálicos, generando estructuras unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales (Kumar et al., 2020; Binaeian et al., 2023). Entre sus propiedades destacan sus elevadas áreas superficiales, la posibilidad de funcionalización química, el ajuste controlado del tamaño de poro y su capacidad de adsorción y desorción, por citar algunos ejemplos (Shen et al., 2022; Xiao et al., 2023).

Debido a esta versatilidad los MOF son atractivos para múltiples aplicaciones tales como: almacenamiento de energía, procesos de separación, adsorción de gases (p. ej., acetileno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, ácido sulfhídrico y ácido clorhídrico) (Freund et al., 2021; Yusuf et al., 2023; Yuvaraj et al., 2024), liberación controlada de gases, procesos catalíticos (p.ej., reacciones de reducción de oxígeno, evolución de oxígeno e hidrógeno, producción de biocombustibles) (Cong et al., 2021; Radwan et al., 2021; Hayat et al., 2024), aplicaciones biomédicas (Wiśniewska et al., 2023) y medioambientales (p. ej., degradación de compuestos orgánicos, y adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos) (Qian et al., 2023), por citar algunos ejemplos.

La síntesis convencional de los MOF suele llevarse a cabo en un reactor donde se mezclan el ligando orgánico y la sal metálica en un solvente orgánico (Moharramnejad et al., 2023). Tras sellar el reactor, se aplica calor hasta superar la temperatura de ebullición del solvente, favoreciendo la reacción de coordinación y la formación de cristales insolubles (MOF), que posteriormente se recuperan mediante procesos de separación físicos (Ghosh et al., 2020; Jahan et al., 2022; Cheng et al., 2024). Sin embargo, esta ruta de síntesis presenta como desventaja un elevado consumo energético y el empleo de reactivos peligrosos para la salud y el medio ambiente (Guan et al., 2021; Wiśniewska et al., 2023). Por ejemplo, la exposición prolongada a solventes como el DMF se ha asociado a efectos carcinogénicos y teratogénicos (Jordan et al., 2022; Apel et al., 2023).

En respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado rutas de síntesis alternativas para la obtención de materiales organometálicos análogos que requieren un menor consumo de energía (como las reacciones mecanoquímicas, que aprovechan la energía cinética generada por el proceso

de molienda para inducir la unión entre el ligando y el nodo metálico) y/o el uso de precursores ambientalmente amigables (Głowniak et al., 2021). Estas estrategias buscan sustituir o reducir el uso de sales metálicas, solventes y/o ligandos (Feng et al., 2019; Głowniak et al., 2021; Nourira et al., 2025) incorporando en su lugar materias primas provenientes de residuos (El-Sayed et al., 2020).

Como sustitutos de nodos metálicos pueden emplearse lodos generados en procesos electroquímicos con alto contenido de níquel (Song et al., 2021); lodos procedentes del curtido de pieles, ricos en cromo (Lu et al., 2022); chatarra de aluminio, como latas o papel aluminio (Panda et al., 2020); baterías alcalinas agotadas que contienen iones metálicos como zinc, níquel, litio, cobalto, hierro y aluminio (Virolainen et al., 2021, Roy et al., 2022); así como soluciones residuales del tratamiento de acero inoxidable, enriquecidas en cromo, hierro y níquel (Zhao et al., 2023). Por otra parte, el tereftalato de polietileno (PET) puede aprovecharse como ligando, ya que, tras su despolimerización, se obtiene ácido tereftálico (Joseph et al., 2024), y dicho compuesto orgánico permite la síntesis de una amplia variedad de MOFs, entre ellos el MOF-5 y la familia MIL-101 (Cognet et al., 2020; Cheng et al., 2024; Chinglenthoinba et al., 2024; Joseph et al., 2024; Li et al., 2024). Además, se ha propuesto el uso de biomasa rica en celulosa, para producir solventes como el cireno, ya que se considera un medio de reacción seguro, de baja toxicidad y biodegradable (Citarella et al., 2022; Wang et al., 2023).

Sin embargo, existe un número limitado de estudios reportados en la literatura en los que se apliquen metodologías integrales de carácter “verde” para la obtención de adsorbentes organometálicos análogos, y que aborden de manera simultánea los problemas previamente mencionados (Karadeniz et al., 2018). En la mayoría de los casos, las investigaciones se limitan a sustituir uno o, en el mejor de los escenarios, dos de los componentes constitutivos de los MOF, y/o introducen modificaciones parciales en la metodología de síntesis, sin integrar un enfoque holístico que considere todas las etapas de dicho proceso (Cognet et al., 2020; Li et al., 2024). Adicionalmente, se especula que los costos de estos adsorbentes análogos pueden verse afectados cuando la estrategia de sostenibilidad se restringe a la sustitución de un único componente (Vellingiri et al., 2018). Como consecuencia, el precio final de producción limita su viabilidad para aplicaciones industriales, en servicios o en el desarrollo de productos de consumo masivo (Severino et al., 2021; Zaman et al., 2021). En este sentido, es necesaria la búsqueda de soluciones integrales que permitan la adopción de estos materiales en escenarios reales.

Con base en estas consideraciones, el presente estudio se enfocó en la evaluación de distintos residuos municipales e industriales como fuentes de nodos metálicos, y solventes verdes, incorporando PET como ligando, para la obtención de adsorbentes organometálicos. Los materiales sintetizados fueron evaluados en la adsorción de xenobióticos presentes en agua. El material con el

mejor desempeño de adsorción fue utilizado en estudios de equilibrio de adsorción de arsénico y fluoruros, tanto en solución acuosa como en agua potable. Los datos de equilibrio obtenidos fueron correlacionados con modelos de física estadística. Los adsorbentes se caracterizaron mediante diferentes técnicas instrumentales antes y después del proceso de adsorción, con el fin de identificar los cambios inducidos por la interacción con los contaminantes. Finalmente, se calcularon los parámetros termodinámicos asociados al proceso de adsorción, y se elucidó el posible mecanismo de adsorción.

1.2 Justificación.

El uso de materiales organometálicos en procesos industriales es reducido y su presencia en productos de consumo prácticamente inexistente. Estas restricciones se deben principalmente a sus elevados costos de producción, asociados tanto al precio de las materias primas como al consumo energético requerido durante la síntesis (El-Sayed et al., 2020). Adicionalmente, estos materiales presentan inestabilidad física y química, lo cual restringe su campo de aplicación (El-Sayed et al., 2020). Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de rutas de síntesis alternativas que ofrezcan ventajas significativas respecto a los métodos tradicionales. Particularmente, se ha optado por sustituir los componentes que los constituyen (es decir: ligandos orgánicos, nodos metálicos y/o solventes) por materias primas de bajo costo y bajo impacto ambiental. Por ejemplo, se ha empleado PET como fuente de ligandos, residuos metálicos como nodos, y solventes verdes como el cireno, en sustitución de solventes convencionales como el DMF. Estas alternativas no solo reducen los costos de síntesis, sino que también representan opciones menos dañinas en términos ambientales y toxicológicos.

Sin embargo, la mayoría de los estudios reportados en la literatura se han limitado a sustituir uno de estos componentes durante la síntesis, y son escasos los trabajos en los que se sustituyen dos o más de manera simultánea. Bajo este escenario, se identifica un área de oportunidad relevante el aprovechamiento de residuos industriales y municipales como fuente de materia prima para la producción de adsorbentes organometálicos. Entre estos residuos destacan aquellos que contienen metales no ferrosos como aluminio, cobre, zinc, cromo o níquel, los cuales pueden emplearse como nodos metálicos (Krishnan et al., 2021); y polímeros como el PET, que puede despolimerizarse para obtener ácido tereftálico y utilizarse como ligando. En consecuencia, este estudio se centró en el aprovechamiento de residuos municipales e industriales como materia prima para la síntesis de adsorbentes organometálicos para la remoción de xenobióticos presentes en el agua.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general

- Sintetizar adsorbentes organometálicos para la remoción de xenobióticos del agua a partir de residuos municipales e industriales.

1.3.2 Objetivos particulares.

- Sintetizar adsorbentes organometálicos empleando diferentes residuos municipales e industriales como fuentes de nodos metálicos, ligandos y/o solventes verdes.
- Evaluar el desempeño de los materiales sintetizados en la remoción de arsénico y fluoruros en solución acuosa, e identificar al adsorbente con mayor eficiencia de adsorción.
- Realizar estudios de equilibrio de adsorción de arsénico y fluoruros en solución acuosa a diferentes condiciones de temperatura utilizando el adsorbente con mejor desempeño de remoción.
- Obtener isothermas de adsorción de arsénico y fluoruros empleando agua potable.
- Caracterizar los adsorbentes organometálicos antes y después del proceso de adsorción mediante técnicas instrumentales avanzadas.
- Correlacionar los datos experimentales de equilibrio con modelos de física estadística.
- Determinar los parámetros termodinámicos que rigen el proceso de adsorción de arsénico y fluoruros empleando adsorbentes organometálicos.
- Elucidar el mecanismo que gobierna la adsorción en los sistemas evaluados.

Capítulo II. Marco teórico.

Los MOFs han despertado un creciente interés dentro de la comunidad científica gracias a su elevada área superficial, la posibilidad de funcionalización química y el control sobre su tamaño de poro, entre otras características (Shen et al., 2022; Xiao et al., 2023). Estos polímeros de coordinación, altamente cristalinos y con porosidad permanente, se forman a partir de la interacción entre ligandos orgánicos (como carboxilatos, fosfonatos, sulfonatos o imidazoles) (ver, Tabla 2.1) y nodos metálicos, generalmente en forma de nitratos, sulfonatos o cloruros (Masoomi et al., 2019; Quian et al., 2023). Si bien los primeros reportes de materiales de este tipo datan de la década de 1960, no fue sino hasta finales de los años ochenta e inicios de los noventa que se describieron estructuras cristalinas con nanoporosidad permanente y amplias áreas superficiales (Zhang et al., 2020; Wiśniewska et al., 2023). En la actualidad, la literatura científica documenta más de 100,000 estructuras de MOFs obtenidas experimentalmente (Demir et al., 2024). Gracias a su versatilidad, estos materiales resultan atractivos para amplia gama de aplicaciones (véase la Tabla 2.2), incluyendo procesos de separación y de remediación ambiental. En este último ámbito, los MOFs han demostrado capacidad para remover diversos contaminantes presentes tanto en corrientes líquidas como gaseosas, en función de sus propiedades estructurales y químicas. En sistemas acuosos, se han empleado exitosamente como adsorbentes para la eliminación de fármacos (Viltres et al., 2024; Nasrabadi et al., 2025), colorantes (Beydaghdari et al., 2022), pesticidas (Mondol et al., 2021), metales pesados (Zadehahmadi et al., 2023), arsénico (Samimi et al., 2022) y fluoruros (Tolkou et al., 2023). Con fines ilustrativos, la Tabla 2.3 resume algunos de estos ejemplos.

La síntesis de MOFs suele realizarse mediante el método solvotermal, en el que los precursores, previamente disueltos, se incorporan en un recipiente de teflón que es colocado dentro de una cubierta de acero (Bhakat et al., 2023). Este reactor se sella y se coloca en un horno capaz de mantener temperaturas superiores al punto de ebullición de los solventes durante un periodo prolongado (Bhakat et al., 2023). Sin embargo, desde una perspectiva económica, la principal desventaja de este método de síntesis radica en su elevado consumo energético (Radwan et al., 2021). Esta limitante ha dado origen a rutas de síntesis orientadas a reducir dichos requerimientos, entre ellas la radiación por microondas, la síntesis mecanoquímica y los métodos sonoquímicos.

La irradiación por microondas propicia la formación de cristales en tiempos considerablemente cortos y en regiones localizadas del reactor (Główniak et al., 2022; Kabir, 2023). Sin embargo, los materiales obtenidos mediante este método suelen presentar variaciones morfológicas y un tamaño de partícula inferior al de los producidos por síntesis hidrotermal (Beamish-Cook et al., 2021; Ma et al., 2021). El método sonoquímico emplea ondas ultrasónicas de alta frecuencia que crean zonas de

cavitación acústica, formando burbujas que, al colapsar, generan altas temperaturas y presiones que promueven la cristalización (Vaitis et al., 2019). No obstante, los cristales resultantes pueden mostrar morfologías no deseadas y tamaños de partícula reducidos (Taghipour et al., 2022). Además, durante este proceso pueden ocurrir fenómenos mecánicos y físicos adicionales (como calentamiento localizado, ondas de choque o microchorros) que influyen en la eficiencia de la reacción (Li et al., 2021). Por otra parte, los procesos mecanoquímicos utilizan energía mecánica para romper los enlaces intramoleculares de los precursores, teniendo como ventaja un consumo de energía reducido, y en algunos casos, es posible llevar a cabo la síntesis con cantidades mínimas de solvente o incluso sin la necesidad de estos (Główniak et al., 2021; Afkhami-Ardekani et al., 2022).

Tabla 2.1. Ejemplos de ligandos utilizados en la síntesis de materiales organometálicos.

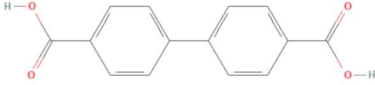
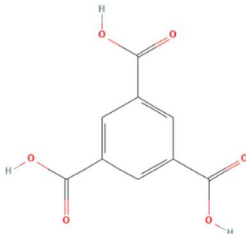
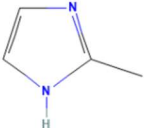
Material	Ligando (Nombre común)	Molécula	Referencia
UiO-66	Ácido 1,4-benzenedicarboxílico		Ribadeneyra et al. (2022)
MOF-5	(Ácido tereftálico, TPA o BDC)		Al-Enizi et al. (2024)
MIL-53			Li et al. (2024)
MIL-101			Zhou et al. (2024)
IRMOF-9	Ácido 4,4'-bifenildicarboxílico (ácido difénico)		Rimi et al. (2023)
MIL-100	Acido 1,3,5-		Quijia et al. (2021)
MOF-808	Benzenotricarboxílico		Demir Duman et al. (2022)
HKUST-1	(Ácido trimésico)		Goyal et al. (2022)
MOF-177	1,3,5-Tri(4-carboxifenil) benceno (BTC)		Gaikwad et al. (2021)
ZIF-8	2-Metilimidazol		Dai et al. (2021)
ZIF-L			Pérez-Miana et al. (2021)
ZIF-67			Wen et al. (2021)

Tabla 2.2. Ejemplos de aplicaciones de MOFs.

Aplicación	Material	Características generales	Referencia
Almacenamiento de gases	MOF-801	Adsorbente de zirconio para captura de H ₂ O e hidrógeno.	Butova et al. (2021)
	MFU-4l-Li	Material a base de zinc modificado con litio para adsorber hidrógeno y metano.	Chen et al. (2021)
	NU-2100	Adsorbente a base de cobre para almacenamiento de hidrógeno.	Sengupta et al. (2023)
Administración de fármacos	MOF-808	Material funcionalizado con glicopolímeros para la carga de fluoxuridina y carboplatino.	Demir Duman et al. (2022)
	ZJU-64-NS	Materiales con diferentes tamaños de poro para liberar procainamida.	Jiang et al. (2022)
	Mg-MOF-74	Utilizado en la liberación de ibuprofeno, 5-fluorouracilo y curcumina.	Pederneira et al. (2023)
Catálisis heterogénea	NH ₂ -TMU-73	Para la obtención de carbonatos cíclicos a partir de CO ₂ .	Abazari et al. (2021)
	Ni-MOF-74	Como precursor para nanopartículas en reacción de evolución de hidrógeno.	Do et al. (2022)
	Cu-BTC/ZnWO ₄	Reducción de tetraciclina en un sistema sonofotocalítico.	Jeyaprakash et al. (2023)
Electrocatalisis	Ru-NiFe-x/NF	Material derivado de Ni y Fe funcionalizado con Ru para electrólisis de urea y H ₂ O.	Wang et al. (2022a)
	Cu-BTC	Base para la obtención de electrocatalizador para la conversión de CO ₂ a metanol.	Yang et al. (2022)
	Fe-Mg/MOF	Usado como supercapacitor y electrodo para evolución de hidrógeno.	Zaka et al. (2023)

Sin embargo, el costo de producción de los MOFs continúa siendo elevado y se encuentra lejos de ser económicamente viable para su integración en procesos industriales o productos de consumo masivo. En consecuencia, una cantidad reducida de estos materiales ha alcanzado una comercialización exitosa. Por ejemplo, la empresa Sigma Aldrich o Merck en el continente americano ofrece MOFs de alta pureza (como MOF-177-Zn, MIL-53-Al y ZIF-8), sintetizados principalmente por la compañía alemana BASF, y sus precios oscilan entre 759 y 1221 MXN por gramo (Chakraborty et al 2024; Sigma, 2025) Otras compañías como la británica Nuada y la estadounidense NuMat producen MOFs para industrias y organismos gubernamentales. Los materiales comercializados por NuMat se emplean en equipos de protección personal y en la eliminación de contaminantes en fases

líquidas y gaseosas (Achenbach et al., 2025). Dicha corporación también ha desarrollado la tecnología ION-X, basada en MOFs, para aplicaciones en semiconductores (Chen et al., 2021), mientras que otras compañías, como MOF Technologies, enfocan su producción para sistemas de captura de carbono (Alić et al., 2024).

Tabla 2.3. MOFs utilizados como adsorbentes de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Contaminante	MOF	Capacidad de adsorción máxima, mg/g	Referencia
Atrazina	Ru-MOF	382.7	Almahri et al. (2023)
	Cu ₃ (BTC) ₂	484.0	Sakthivel et al (2024)
Amarillo de metileno	Cu ₃ (BTC) ₂	777.0	Haleem et al. (2024)
Naranja de metileno		903.0	Sakthivel et al (2024)
Diclofenaco	MOF-525	~790.0	Prasetya et al. (2023)
	MOF-545	~620.0	
	NU-902	~450.0	
Glifosato	MIL-125-Ti	128.0	Naghdi et al. (2023)
	NH ₂ -MIL-125-Ti	118.0	
Ibuprofeno	ZIF-67	187.0	Abbas et al. (2025)
	Ni@ZIF-67	225.0	
Sulfametoxazol	MOF-525	585.0	Venturi et al., 2020
	MOF-545	650.0	
	Fe-BTB	276.0	Viltres et al. (2024)
Antimonio	Fe-MIL-88B	Sb(III) 566.1	Fu et al. (2022)
		Sb(V) 318.9	
Arsénico	Fe-MIL-88A	As(V) 145.0	Fu et al. (2022)
	MIL-53(Al)	As(V) 105.6	
	MIL-88B	As(III) 156.7	
Bario	Zr-MSA-SO ₃ H	Ba(II) 128.2	Zhao et al. (2023a)
	Zr-DMSA-SO ₃ H	Ba(II) 224.0	
Cromo	MOF-5	Cr (VI) 78.1	Babapour et al. (2022)
	TMPA@MOF-801	Cr (VI) 350.64	Zhao et al. (2023b)
Cobre	Fe ₃ O ₄ @Fe-BTC	Cu(II) 55	Castañeda-Ramirez et al. (2022)
Fluoruros	UiO-66	31.1	Tolkou et al. (2023)
	MOF-801	40.0	
	Al-MOF-5	46.1	

En este contexto, uno de los principales desafíos para la incorporación de MOFs en aplicaciones comerciales consiste en disminuir sus costos de producción (El-Sayed et al., 2020; Cosimbescu et al., 2021; Severino et al., 2021). Para atender esta situación se ha propuesto el uso de materias primas alternativas de bajo costo (Deleu et al., 2016; El-Sayed et al., 2020; Noura et al., 2025). Entre ellas destacan los residuos de PET, cuya producción anual supera los 300 millones de toneladas métricas, de las cuales se recicla el ~10% (Ribadeneyra et al., 2022; Noura et al., 2025). Este polímero puede aprovecharse como fuente de ligandos en la síntesis de MOFs (Ribadeneyra et al., 2022; Noura et al., 2025). En particular, es posible obtener ácido tereftálico a partir de la despolimerización de este material mediante procesos de solvólisis (como: metanólisis, hidrólisis ácida o alcalina, glicólisis, aminólisis o amonólisis), y recuperarlo por destilación para su empleo posterior en la síntesis de MOFs (Joseph et al., 2024; Li et al., 2024; Muringayil et al., 2024). Alternativamente, el PET puede emplearse directamente como precursor en síntesis solvotermales, donde las condiciones de temperatura y presión autógena del sistema resultan suficientes para promover su despolimerización (Karam et al., 2021; Cheng et al., 2024).

Asimismo, algunos óxidos, hidróxidos y sulfatos metálicos de grado industrial, así como residuos metálicos generados en procesos industriales, pueden emplearse como fuentes de nodos metálicos debido a su elevado contenido de metales. Entre ellos destacan los lodos residuales de procesos electroquímicos, ricos en níquel, cromo, cobre, plomo y zinc (Guo et al., 2024), los procedentes de la industria automotriz, con altas concentraciones de cadmio, cromo y níquel (Giacomin et al., 2019), y los derivados del curtido de pieles, caracterizados por su abundancia en cromo (Lu et al., 2022). De acuerdo con Lu et al. (2022), este último tipo de residuo puede utilizarse en la síntesis de MOFs de la familia MIL-101 mediante carbonización hidrotermal, obteniéndose materiales aptos para la captura de CO₂ y CO, así como para el almacenamiento de H₂O. Dichos autores demostraron que el desempeño de estos MOFs (~1.8 mmol/g de CO₂, ~0.35 mmol/g de CO y ~70 g de H₂O/100 g de MOF) supera al de aquellos sintetizados con reactivos de grado analítico (~1.2 mmol/g de CO₂, ~0.30 mmol/g de CO y ~35 g de H₂O/100 g de MOF). Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de nodos metálicos múltiples, ya que se ha demostrado que los MOFs con estructuras bimetálicas o multimetálicas exhiben mayor estabilidad, eficiencia en la transferencia de electrones y mejor conductividad, entre otras propiedades (Nguyen et al., 2021). Las aguas de decapado generadas en la producción de acero inoxidable también se han empleado como un precursor efectivo para la síntesis de MOFs (Zhao et al., 2022). Dichos materiales mostraron capacidades de adsorción de ~650 mg/g en la remoción de azul de metileno, ~490 mg/g para el antibiótico moxifloxacino y de ~200 mg/g para iones de circonio.

Como parte de los principios de la química verde propuestos en el año 2000, los cuales en sus apartados (5) y (12) promueven el uso de solventes seguros, condiciones de reacción moderadas, y la sustitución de reactivos, productos y subproductos tóxicos (Anastas et al., 2000), se han buscado alternativas al uso de N,N-dimetilformamida (DMF). Entre ellas se incluyen alcoholes, ésteres, carbonatos, cetonas, éteres, solventes polares novedosos como el cireno, e incluso agua (Yassin et al., 2021; Citarella et al., 2022; Wang et al., 2023; James et al., 2024). En el caso particular del agua, es necesario incorporar agentes químicos (p. ej., ácidos orgánicos o inorgánicos como ácido acético o ácido nítrico) para modular la reacción de síntesis y controlar el crecimiento de las estructuras organometálicas cristalinas (Bigdeli et al., 2023).

Aunque se han sintetizado diversos MOFs empleando solventes alternativos y moduladores en sustitución de DMF, se ha demostrado que algunos compuestos como el anisol, no permiten obtener estructuras cristalinas análogas, y algunos solventes como el acetato de 2-etilhexilo, acetato isobutílico, acetato isopropílico y acetato de isoamilo conducen a la formación de materiales amorfos, en los cuales no es posible identificar los picos de difracción característicos de los MOF (Venturi et al., 2020). En contraste, se ha logrado la síntesis exitosa de MOFs con áreas superficiales de hasta $\sim 930 \text{ m}^2/\text{g}$ empleando solventes como 5-metilhexan-2-ona, 1,3-propanodiol y carbonato de propileno (Venturi et al., 2020). Esto evidencia que la selección del solvente es un factor crítico para garantizar la síntesis exitosa de este tipo de materiales (Molavi et al., 2025). Pese a estos avances, la aplicación práctica de estas alternativas continúa siendo limitada. En la mayoría de los estudios reportados, la estrategia se restringe a sustituir uno o, en el mejor de los casos, dos de los precursores de la síntesis, en lugar de adoptar enfoques integrales donde todos los constituyentes sean considerados “verdes”. En este sentido, resulta imprescindible avanzar hacia métodos holísticos que permitan la implementación real y sostenible de los MOFs en aplicaciones industriales y tecnológicas.

Con base en estas consideraciones, el presente estudio se centró en la evaluación de residuos municipales e industriales como fuentes alternativas de nodos metálicos y solventes verdes, así como en la incorporación de PET como ligando para la síntesis de adsorbentes organometálicos. Los materiales obtenidos se evaluaron en la adsorción de arsénico y fluoruros, seleccionándose el de mayor eficiencia para realizar estudios de equilibrio de adsorción, tanto en solución acuosa como en agua potable. Los datos de equilibrio se correlacionaron con modelos de física estadística, y los adsorbentes se caracterizaron mediante diversas técnicas instrumentales antes y después del proceso de adsorción, con el fin de identificar los cambios inducidos por la interacción con los contaminantes. Finalmente, se determinaron los parámetros termodinámicos del proceso y se elucidó el posible mecanismo de adsorción.

Cabe mencionar que el arsénico y los fluoruros fueron seleccionados como contaminantes de estudio por su origen predominantemente geogénico y su amplia distribución a escala global. Tal como se observa en la Figura 2.1, su presencia se concentra en regiones próximas a cinturones orogénicos, donde ocurren procesos de subducción de placas tectónicas o convergencia continental (Mukherjee et al., 2024). Específicamente, en el territorio mexicano se han encontrado concentraciones elevadas de arsénico en aguas subterráneas, particularmente en la zona centro y norponiente del país, así como en algunos estados que integran el valle de México (Conagua, 2025). De manera análoga, la contaminación por fluoruros se registra en áreas geográficas coincidentes, con reportes relevantes en entidades como San Luis Potosí y Oaxaca (Conagua, 2025).

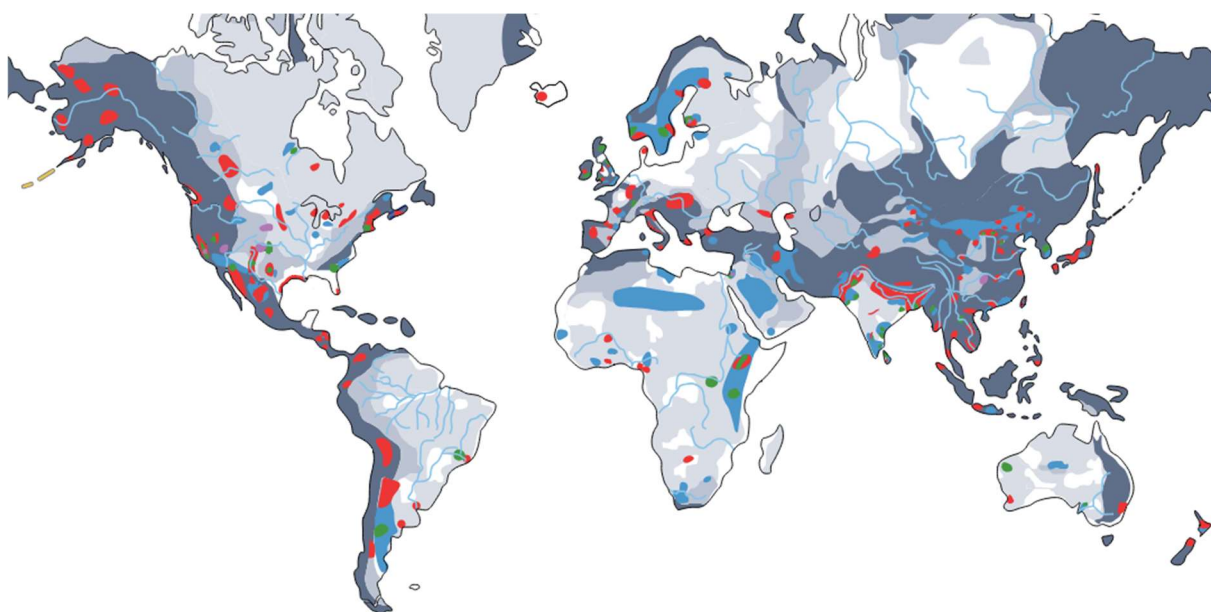


Figura 2.1. Zonas geográficas y distribución de algunos contaminantes geogénicos importantes (■ arsénico, ■ fluoruro, ■ selenio y ■ uranio) encontrados en aguas. ■ Cratones, ■ cinturón orogénico, ■ cuenca antepaís, — ríos mayores.

La exposición crónica al arsénico a través del consumo de agua contaminada se asocia con una amplia gama de efectos adversos para la salud como diabetes mellitus, alteraciones cutáneas (p.ej., hiperpigmentación y engrosamiento epidérmico) y trastornos cardiovasculares, neurológicos y respiratorios (Kaur et al., 2024). Adicionalmente, la normatividad mexicana vigente establece límites permisibles de arsénico en agua potable hasta 400 veces superiores a los valores de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud, lo que pone de manifiesto una brecha regulatoria sustancial y un riesgo significativo para la población expuesta (WHO, 2017). Por su parte, la ingesta de fluoruros se vincula con efectos tóxicos multisistémicos, que incluyen daño en órganos

vitales como hígado, corazón, riñones, cerebro y sistema reproductor, así como alteraciones en el ADN (Tolkou et al., 2023). A estos compuestos se les atribuyen, además, propiedades teratogénicas y repercusiones negativas en el desarrollo infantil (Tolkou et al., 2023). Además, diversos estudios han demostrado altas capacidades de adsorción para estos contaminantes cuando se emplean MOFs para su remoción (Wang et al., 2021; Song et al., 2022; Quintero-Álvarez et al., 2023; Villarroel-Rocha et al., 2024; Quintero-Álvarez et al., 2025).

Capítulo III. Metodología.

3.1 Materiales y reactivos.

Se recolectaron envases de tereftalato de polietileno (PET) y residuos metálicos (líquidos y sólidos) provenientes de la industria metalmecánica y de fundición en el estado de Aguascalientes. Los residuos metálicos incluyeron: agua de decapado de piezas de hierro, lodos generados en procesos de cromado de partes automotrices, escorias derivadas de la fundición de plomo, acero y hierro, así como chatarra de aluminio y hierro. Los residuos líquidos se emplearon como fuente de nodos metálicos y como solvente, mientras que los residuos sólidos se utilizaron como nodos metálicos en la síntesis de adsorbentes organometálicos. Previo a la síntesis de los adsorbentes, el PET se lavó y trituró hasta obtener un tamaño de partícula de ~ 1.2 mm, el agua residual de decapado se filtró para eliminar sólidos suspendidos, las escorias metálicas se molieron hasta alcanzar un tamaño de partícula promedio de ~ 0.2 mm, los lodos residuales se secaron en una campana de extracción a temperatura ambiente durante 72 h, y la chatarra de aluminio y hierro se utilizó sin procesamiento previo.

Para la síntesis de los adsorbentes organometálicos se emplearon como solventes dimetilformamida (DMF), ácido acético glacial y agua desionizada. Durante la síntesis, se adicionó HNO_3 cuando se emplearon aguas residuales y PET como precursores. Se utilizaron fluoruro de sodio (NaF) y una solución estándar de arsénico (1000 mg/L) para preparar las soluciones de fluoruros y arsénico, respectivamente. Para ajustar el pH inicial de dichas soluciones se emplearon HNO_3 y NaOH. Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico (pureza $\geq 99.9\%$) y se emplearon sin purificación adicional.

3.2 Síntesis de adsorbentes organometálicos empleando residuos metálicos y PET.

Se evaluaron distintas rutas de síntesis tomando como referencia las condiciones experimentales reportadas por Li et al. (2024), quienes emplearon PET, sales metálicas, agua desionizada y DMF como precursores para la obtención de adsorbentes organometálicos. Asimismo, se consideraron las condiciones propuestas por Li et al. (2023), quienes utilizaron ácido acético y agua como alternativa para la síntesis de materiales organometálicos análogos, así como la metodología descrita por Zhao et al. (2023), en la cual se empleó agua de decapado para la preparación de este tipo de adsorbentes. Con fines ilustrativos, en la Figura 3.1 se presenta el procedimiento de síntesis adoptado en este estudio.

Específicamente, se mezclaron 10 g de residuos metálicos con 5 g de PET en presencia de DMF y agua (en una relación de 3.5 v/v) dentro de un reactor hidrotermal sometido a tratamiento térmico de 180 °C durante 12 h. Por otra parte, la síntesis de adsorbentes organometálicos utilizando agua de decapado se realizó con 20 mL de dicho efluente, previamente ajustado a pH 5, manteniendo invariables las demás condiciones de síntesis. El adsorbente obtenido se recuperó por filtración, se lavó con DMF y acetona, se secó en una estufa de convección a 65 °C, y se molió y tamizó hasta obtener partículas con tamaño inferior a 0.18 mm.

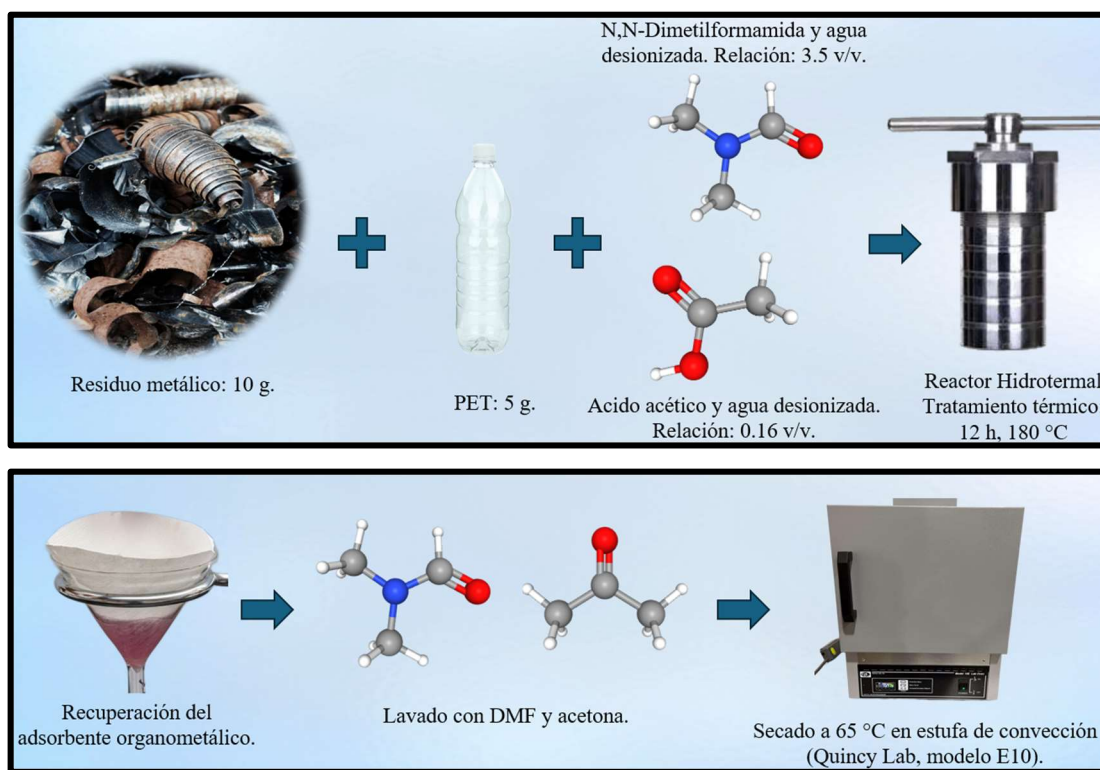


Figura 3.1. Representación esquemática de la síntesis de adsorbentes organometálicos a partir de residuos metálicos y PET.

3.3 Evaluación del desempeño de los adsorbentes organometálicos en la remoción de arsénico y fluoruros.

Se llevaron a cabo experimentos de adsorción de arsénico y fluoruros en sistemas por lotes con el propósito de evaluar el desempeño de los materiales sintetizados, conforme a las condiciones experimentales descritas en la Figura 3.2. Con base en las capacidades de adsorción obtenidas, se seleccionó el material con mejor desempeño (referido como CFe-DMF, el cual fue sintetizado a partir de chatarra de hierro, PET, DMF y agua), y se realizaron estudios de equilibrio a 30 y 40 °C

empleando soluciones de arsénico y fluoruros con concentraciones iniciales (C_i) de 10 – 250 y 10 – 300 mg/L, respectivamente. Por otra parte, se obtuvo una isoterma de adsorción para estos contaminantes a 30 °C utilizando soluciones preparadas con agua de la llave, con el propósito de evaluar el efecto de la presencia de otros iones sobre la capacidad de adsorción.

La cuantificación de arsénico se efectuó mediante espectrometría de absorción atómica utilizando un equipo Thermo Scientific, modelo iCE 3500. Para el caso de los fluoruros, la concentración se determinó mediante un electrodo selectivo, empleando solución TISAB como regulador de la fuerza iónica. Las capacidades de adsorción (q_e , mmol/g) se calcularon mediante el balance de materia expresado en la Ecuación 3.1, donde C_e corresponde a la concentración en equilibrio (mmol/L), V al volumen de la solución (L) que contiene al adsorbato, y m a la masa de adsorbente (g) utilizada en los estudios de adsorción.

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)}{m} * V \quad \text{Ec. (3.1)}$$

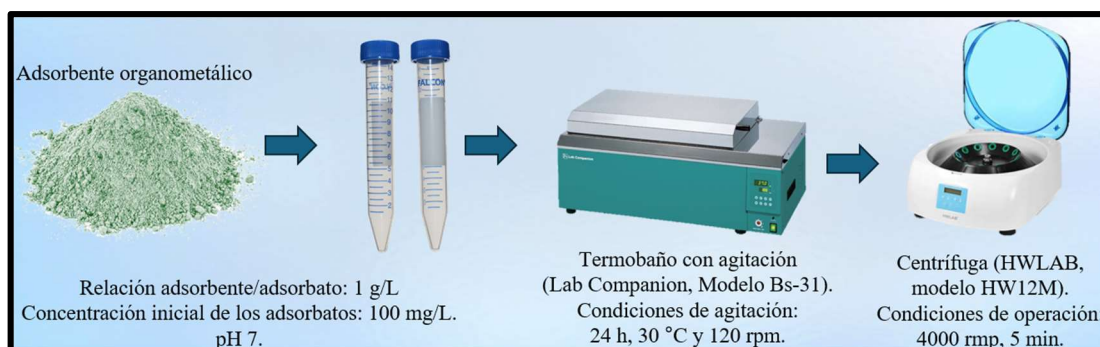


Figura 3.2. Condiciones experimentales usadas en la remoción de arsénico y fluoruros empleando adsorbentes organometálicos sintetizados a partir de residuos metálicos y PET.

3.4 Caracterización fisicoquímica del adsorbente CFe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.

El adsorbente CFe-DMF se caracterizó antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopia electrónica de barrido acoplada con espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX) y análisis termogravimétrico (TGA). Estas técnicas permitieron identificar la estructura cristalina, los grupos funcionales, la morfología y composición elemental, la estabilidad térmica y los procesos de descomposición del material organometálico. En la Figura 3.3 se muestran los equipos utilizados, así como la información relacionada con la configuración y condiciones de medición aplicadas en el análisis de las muestras. Cabe señalar que, previo al análisis

por SEM-EDX, tanto el adsorbente organometálico como la muestra expuesta a condiciones salinas fueron recubiertos con una fina capa de oro.

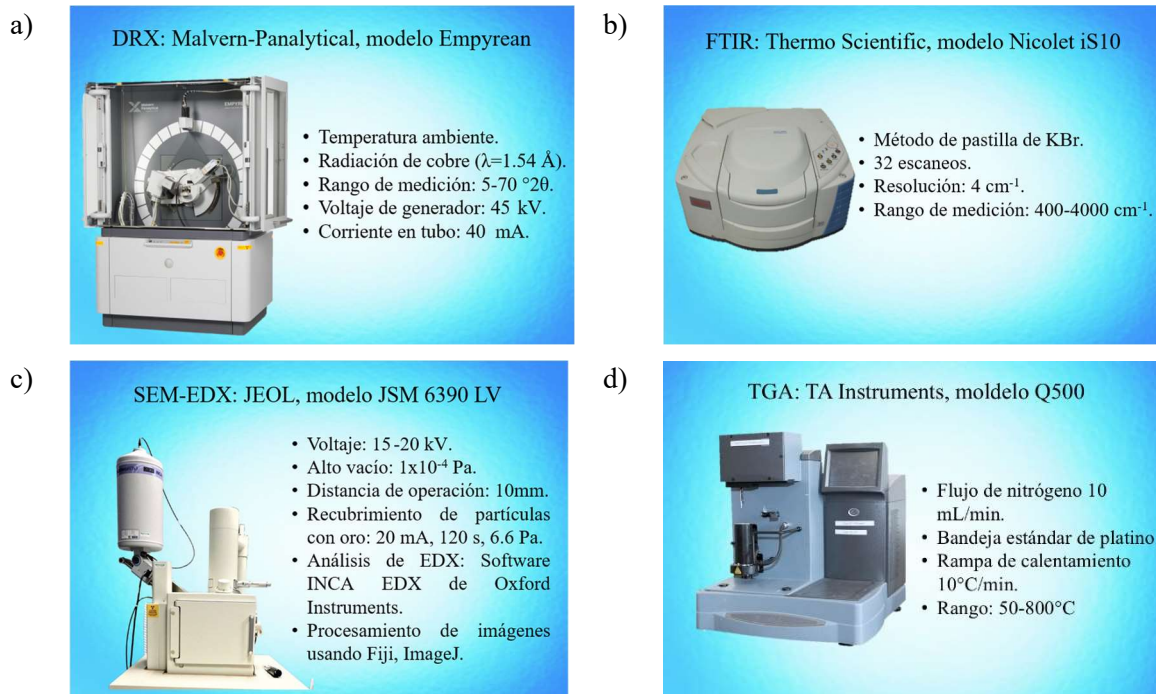


Figura 3.3. Equipos y condiciones de medición utilizadas para la caracterización del adsorbente CFedMF. a) DRX, b) FTIR, c) SEM-EDX y d) TGA.

La correlación de los datos de equilibrio obtenidos experimentalmente se realizó mediante modelos basados en física estadística (véanse las Ec. 3.2 – 3.9) utilizando la herramienta Solver de Microsoft Excel. Estos modelos ofrecen ventajas significativas frente a los enfoques empíricos tradicionales, como los propuestos por Langmuir, Freundlich y Sips, cuyas ecuaciones parten de supuestos ideales que no siempre representan el comportamiento de los sistemas reales. En contraste, los modelos de física estadística permiten estimar parámetros de relevancia, tales como el número de iones adsorbidos por sitio activo, la energía de adsorción y el número de capas formadas durante este proceso (Duan et al., 2024). Además, estos modelos proporcionan parámetros con interpretación física al incorporar las siguientes consideraciones (Amrhar et al., 2021):

- A bajas concentraciones las interacciones adsorbato-adsorbato pueden despreciarse. Sin embargo, a altas concentraciones es indispensable incluirlas para describir adecuadamente el sistema.
- Para el caso de adsorbatos monoatómicos se deben de despreciar los grados de libertad asociados a movimientos rotacionales, vibracionales, electrónicos y nucleares, y considerar a las especies como suspendidas en un medio acuoso.

- El grado de libertad traslacional se puede incorporar para reflejar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento del adsorbato.
- Se considera que la unidad de masa del sólido contiene N_M sitios de adsorción, cada uno caracterizado por su propia energía ($-\varepsilon$), con capacidad para adsorber una cantidad variable de iones.

Bajo estas consideraciones, los modelos de adsorción se fundamentan en el ensamble gran canónico, empleando la función de partición correspondiente para describir el fenómeno de adsorción. Dicha función de partición (Z_{gc}) se expresa como:

$$Z_{gc}(T, \mu) = \sum_{N_i} e^{-\beta(-\varepsilon - \mu) N_i} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde T representa la temperatura (K) del sistema, μ es el potencial químico de la especie adsorbida y N_i denota el número de especies adsorbidas en un sitio determinado. El parámetro β es el inverso de la energía térmica promedio, y se define como:

$$\beta = \frac{1}{K_B T} \quad \text{Ec. 3.3}$$

siendo K_B la constante de Boltzmann ($K_B = 1.380 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). Por otra parte, la función de partición total gran canónica se representa de la siguiente forma:

$$Z_{Total} = (Z_{gc})^{N_m} \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde N_m corresponde a la densidad de sitios idénticos ocupados por adsorbato y el número promedio de ocupaciones de sitio (mg/g), mientras que N_0 , representa el número medio de sitios de adsorción ocupados, y se determina mediante la relación:

$$N_0 = \frac{1}{\beta} \frac{\partial \ln Z_{Total}}{\partial \mu} = N_M K_B T \frac{\partial \ln Z_{gc}}{\partial \mu} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Adicionalmente se considera la función de traslación por unidad de volumen (z_{tr}) m^{-3} , donde m es la masa de una molécula de adsorbato en kg, y h es la constante de Planck equivalente a $6.26 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$.

$$z_{tr} = \left(\frac{2\pi m K_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Por otra parte, el potencial químico en el sistema puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_m = K_B T \ln \left(\frac{C}{z_{tr}} \right) \quad \text{Ec. 3.7}$$

Dentro del marco de la física estadística, se han desarrollado numerosos modelos basados en las expresiones gran canónicas para describir los procesos de adsorción. Estos enfoques consideran tanto

el número de capas de adsorbato que pueden formarse sobre la superficie del adsorbente como la distribución de energías de adsorción asociadas a los distintos sitios activos (Wjihi et al., 2019). A partir de estas consideraciones se han propuesto diversos modelos de física estadística generalizados. Entre ellos se incluye el modelo de monocapa con una energía de adsorción, el cual fue utilizado en este estudio para correlacionar los datos de equilibrio, y se representa de la siguiente forma:

$$q = \frac{n * N_m}{1 + \left(\frac{C_{1/2}}{C}\right)^n} \quad \text{Ec. 3.8}$$

donde C y $C_{1/2}$ representan la concentración de equilibrio (mmol/g) y la concentración a media saturación (mmol/g), respectivamente. En este modelo cuando $n=1$, la expresión se reduce al modelo de Langmuir, y a bajas concentraciones el modelo del sistema converge hacia el modelo de Freundlich. Cabe mencionar que se seleccionó este modelo tomando en cuenta los resultados de caracterización, los cuales sugieren que el nodo metálico (Fe) participa en el proceso de adsorción tanto del arsénico como de los fluoruros (ver sección 4.2).

Por otra parte, se calculó la cantidad total de adsorbato adsorbido (q_{Sat} , mmol/g) en condiciones de saturación usando la mediante expresión matemática:

$$q_{Sat} = nN_0 \quad \text{Ec. 3.9}$$

El ajuste de los datos se realizó tomando en consideración la suma de mínimos cuadrados como función objetivo

$$\sum_{i=1}^{ndat} (q_{ical} - q_{iexp})^2 \quad \text{Ec. 3.10}$$

Finalmente, se estimó el cambio en la entalpía (ΔH° , kJ/mol) mediante el gráfico de van't Hoff y las siguientes ecuaciones (AlHazmi et al., 2022):

$$\Delta G^0 = -RT \ln(K_D) \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$K_D = \frac{C_a}{C_e} \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde ΔG° (kJ/mol) representa el cambio en la energía libre de Gibbs, ΔS° (kJ/mol) es el cambio en la entropía, R es la constante universal de los gases ideales (8.314 J mol/K), T es la temperatura a la que se llevó a cabo el proceso de adsorción (K), K_D es el coeficiente lineal de distribución de adsorción, C_a denota la concentración de equilibrio del adsorbato sobre la superficie del adsorbente (L/g).

Capítulo IV. Resultados

4.1. Evaluación del desempeño de los adsorbentes organometálicos en la remoción de arsénico y fluoruros.

Se sintetizaron ocho adsorbentes a partir de PET y los diferentes residuos procedentes de la industria metalmeccánica y de fundición tales como: agua de decapado de piezas de hierro (AD), lodos generados en procesos de cromado de partes automotrices (LCr), escorias de la fundición acero (EAc) y hierro (EFE), así como chatarra de aluminio (CAI) y hierro (CFe). Los materiales obtenidos se rotularon de acuerdo con su fuente metálica y el solvente empleado en su síntesis (dimetilformamida y agua: DMF, ácido acético glacial y agua: AC, y agua de decapado: AD). La cantidad que se obtuvo del adsorbente EFE-DMF fue bastante pequeña (~ 0.06 g), por lo que se excluyó del estudio.

Con los adsorbentes restantes se hicieron estudios de adsorción preliminares de arsénico (As) y fluoruros (F), siguiendo la metodología descrita en la sección 3.3. Bajo las condiciones experimentales evaluadas, las capacidades de adsorción oscilaron entre de 0 y 0.65 mmol/g para As y entre 0 y 0.57 mmol/g para F, como se observa en la Figura 4.1. El material sintetizado a partir de escorias de acero con DMF no mostró capacidad de adsorción para ninguno de los contaminantes. En contraste, la incorporación de ácido acético durante la síntesis permitió alcanzar capacidades de adsorción de 0.19 mmol/g para As y 0.02 mmol/g para F. De acuerdo con Feng et al. (2019), bajo condiciones de pH elevado, se pueden formar hidróxidos de aluminio insolubles, y por esta razón, en la síntesis de materiales organometálicos de aluminio se utilizan distintos ácidos como agentes moduladores (Steenhaut et al., 2021; Górtazar et al., 2025).

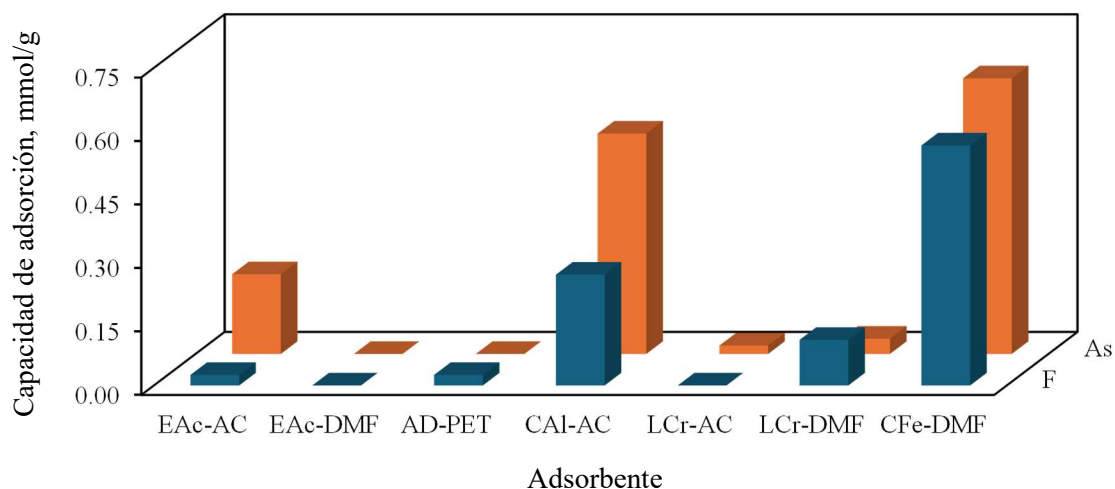
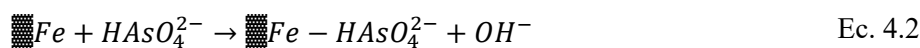
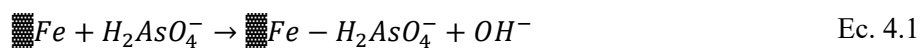


Figura 4.1. Capacidades de adsorción de arsénico (■) y fluoruros (■) de los adsorbentes organometálicos sintetizados a partir de residuos metálicos y PET.

Los adsorbentes preparados con agua de decapado, y lodos de cromado en presencia de ácido acético presentaron capacidades de adsorción muy bajas (≤ 0.02 mmol/g) para ambos adsorbatos. Por el contrario, los materiales derivados de chatarra de aluminio exhibieron capacidades competitivas (As: 0.52 mmol/g, F: 0.26 mmol/g). Destacó especialmente el adsorbente obtenido a partir de escoria de hierro y DMF, cuyas capacidades de adsorción de arsénico y fluoruros fueron de 0.65 y 0.57 mmol/g, respectivamente. De acuerdo con Altowayti et al. (2022) los compuestos de hierro suelen exhibir mejores capacidades de adsorción que los compuestos de aluminio, debido a que al ponerse en contacto con el agua pueden formar complejos (p.ej. hidróxidos) coordinados altamente estables (Nguyen et al., 2023). Con base en estos resultados, se seleccionó este último adsorbente para la obtención de los datos de equilibrio.

Las isotermas de adsorción obtenidas para ambos contaminantes (ver Figura 4.2) corresponden al tipo I, de acuerdo con la clasificación propuesta por Giles (Al-Ghouti et al., 2020). En particular, se observa una remoción casi completa a bajas concentraciones, mientras que a concentraciones más elevadas la curva tiende a formar una meseta que refleja la saturación del adsorbente. La capacidad máxima de adsorción alcanzada para arsénico fue de 0.62 y 0.67 mmol/g a 30 y 40 °C, respectivamente (Figura 4.2a). Para el caso de fluoruros, los valores máximos correspondieron a 0.71 y 0.73 mmol/g para las mismas condiciones de temperatura (Figura 4.2b), empleando soluciones acuosas. Como se observa, las capacidades de adsorción de fluoruros son superiores a las del arsénico. Una posible explicación de este comportamiento radica en una mayor afinidad entre los fluoruros y el nodo metálico (hierro) del adsorbente, ya que al tener un tamaño iónico menor que el arseniato, puede aproximarse con mayor facilidad y favorecer las interacciones adsorbente-adsorbato (Acharya et al., 2024). Además, su elevada electronegatividad favorece dichas interacciones (Acharya et al., 2024). Por el contrario, el arsénico tiende a formar complejos que ocupan un mayor número de sitios activos, y pueden afectar la carga electrostática del adsorbente (Hu et al., 2023). Considerando esta información, el mecanismo de adsorción de arsénico y fluoruros sobre la superficie del adsorbente (■) se puede representar mediante las siguientes expresiones:



Por otra parte, el comportamiento endotérmico observado es consistente con la información reportada por Li et al. (2019), Jeyaseelan et al. (2020), Wang et al. (2021), Singh et al. (2022) y Khalooei et al. (2024), quienes utilizaron MIL-101(Fe), ZIF-67, UiO-67-NDC como adsorbentes de arsénico, y Al-MOF-5, Zr@Fu, La@Fu y Fe@Fu en la remoción de fluoruros, respectivamente. Por

otra parte, el cambio en la entalpía indica que la remoción de arsénico (ΔH : 163.75 kJ/mol) se llevó a cabo mediante un proceso de quimisorción, mientras que la adsorción de fluoruros ocurre por fisisorción (ΔH : 9.49 kJ/mol) (Shankar et al., 2023). Resultados similares han sido reportados por Li et al. (2019), Jeyaseelan et al. (2020), Feng et al. (2025) y Quintero-Alvarez et al. (2025).

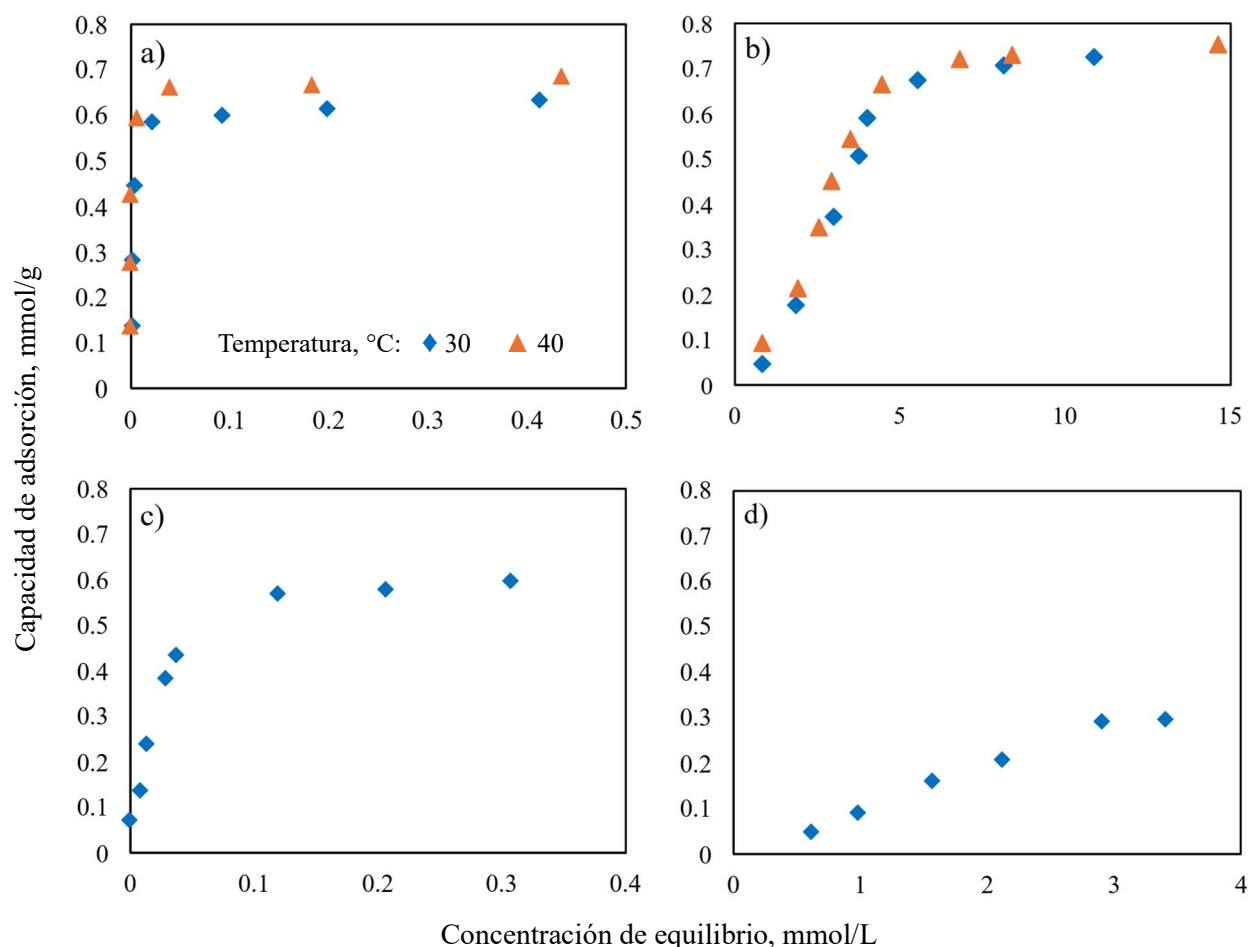


Figura 4.2. Isothermas de adsorción de arsénico (a, c) y fluoruros (b, d) en solución acuosa (a, b) y agua potable (c, d) empleando el adsorbente CFe-DMF.

Como se observa en la Figura 4.2, el incremento de la temperatura favorece la remoción de ambos contaminantes. En el caso del arsénico, la mayoría de los estudios de adsorción empleando materiales organometálicos reportan un comportamiento endotérmico (Samimi et al., 2023). No obstante, algunos trabajos han reportado procesos exotérmicos, lo que evidencia la influencia de la naturaleza del adsorbente y de las condiciones experimentales en el proceso de adsorción (Huang et al., 2023; Geng et al., 2025). Por su parte, la adsorción de fluoruros presenta un comportamiento variable entre distintos tipos de adsorbentes organometálicos. En algunos sistemas, la adsorción se ve favorecida

con el aumento de la temperatura, mientras que en otros casos ocurre un efecto contrario (Quintero-Alvarez et al., 2025). Aunque para este contaminante el proceso de adsorción suele ser exotérmico, se presentan excepciones cuando los iones de fluoruro se coordinan con los centros metálicos del adsorbente. Este comportamiento ha sido reportado por Tolkou et al. (2023) para adsorbentes organometálicos como La-MOF, Fe@BDC y Ce@BDC, y por Wang et al. (2021) para el material Al-MOF-5.

Las capacidades de adsorción obtenidas en este estudio son competitivas, y superan los valores reportados para algunos adsorbentes organometálicos (ver Tabla 4.1) entre los que destacan aquellos a base de hierro, circonio, aluminio y zinc utilizados en la remoción de arsénico (Biswal et al., 2022), y frente a adsorbentes que incorporan aluminio, cerio, lantano y circonio empleados en la adsorción de fluoruros (Tolkou et al., 2023). Estos resultados evidencian el potencial de los residuos metálicos como materia prima alternativa, sostenible y de bajo costo para la síntesis de adsorbentes organometálicos. Además, el aprovechamiento de estos subproductos contribuye a reducir el impacto ambiental asociado con su disposición final y se alinea con el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 12 “Consumo y producción responsables” (Organización de las Naciones Unidas., 2024). A su vez, este enfoque tiene un impacto directo y positivo con el objetivo ODS6 (Agua Limpia y Saneamiento) ya que dichos adsorbentes son una alternativa efectiva para el tratamiento de aguas contaminadas con agentes geogénicos tóxicos, como el arsénico y los fluoruros.

La capacidad de adsorción de arsénico y fluoruros se redujo en un ~6 y 58 %, respectivamente, al emplear agua potable enriquecida con dichos contaminantes. Estos resultados son consistentes con los reportados por Guo et al. (2007) y Zhao et al. (2012), quienes estudiaron la adsorción de arsénico y fluoruros, respectivamente, utilizando agua potable. La disminución en dicha capacidad de adsorción se atribuye a un efecto antagónico originado por la presencia de otros iones (p.ej., HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Na^+ o K^+) en el agua que compiten por los sitios de adsorción disponibles en la superficie del adsorbente. En particular, los iones bicarbonato, sulfato y fosfato suelen interferir en la adsorción de fluoruros, ya que suelen presentar alta afinidad por los grupos funcionales que contienen hierro (Qiusheng et al., 2015; Jeyaseelan et al., 2020). Por otra parte, la adsorción de arsénico se ve afectada principalmente por el ion fosfato, debido a que su similitud estructural (AsO_4^{3-} y PO_4^{3-}) les confiere un comportamiento químico análogo en los sistemas de adsorción (Ahmed et al., 2024; Liu et al., 2025). Adicionalmente, el pH del sistema es un factor que impacta el proceso de adsorción, y en el caso del agua potable, pequeñas variaciones en el pH pueden modificar el estado de protonación de la superficie del adsorbente. Aunque cabe señalar, que en este estudio el pH no debería representar un factor limitante, dado que los experimentos de adsorción se realizaron a un pH neutro.

Tabla 4.1. Análisis comparativo de capacidades máximas de adsorción máximas (q_{max}) de arsénico y fluoruros para diferentes adsorbentes organometálicos.

Adsorbato	Adsorbente	T, °C	pH	q_{max} , mmol/g	Referencia
Arsénico	MIL-53(Fe)	25	7.0	0.15	Vu et al. (2015)
	UiO-66(Zr)	25	7.0	1.04	Wang et al. (2015)
	MIL-101(Fe)	25	7.0	1.58	Li et al. (2019)
	MIL-100(Fe)	25	8.0	0.49	Chia et al. (2023)
	ZIF-67	47	6.0	0.45	Khalooei et al. (2024)
	CAU-17	25	9.0	1.07	Qin et al. (2025)
	CFe	40	7.0	0.67	Este estudio
Fluoruros	MIL-801	25	2.0	2.10	Zhu et al. (2018)
	MIL-53(Fe)	25	4.0	0.22	Hossien et al. (2021)
	Fe-BDC	50	7.0	0.25	Jeyaseelan et al. (2021)
	Al-MOF	40	7.0	2.10	Wang et al. (2021)
	NH ₂ -MIL-101(Al)	25	1.0	1.84	Luo et al. (2024)
	Fe ₃ O ₄ @La-Zr-MOF	45	3.0	20.98	Zhang et al. (2025)
	CFe	40	7.0	0.73	Este estudio

Los resultados obtenidos a partir de la correlación de los datos de equilibrio se presentan en la Tabla 4.2. La información resultante sugiere que el proceso de adsorción ocurre sobre una superficie relativamente homogénea, donde los sitios activos presentan energías de adsorción similares. Estos resultados concuerdan con los obtenidos mediante EDX y FTIR, los cuales evidencian la presencia predominante de especies asociadas al hierro, y la participación de estos grupos funcionales en el proceso de adsorción de los iones estudiados. El número máximo de sitios de adsorción ocupados por unidad de masa del adsorbente (N_m) osciló entre 0.24 y 0.50. Estos valores sugieren una ocupación parcial de los sitios activos del adsorbente, que podría atribuirse a la heterogeneidad superficial del material (Amrhar et al., 2021). De acuerdo con el número de especies adsorbidas en equilibrio (n : 1.24 – 3.11), los fluoruros pueden estar adheridos de forma perpendicular sobre la superficie del adsorbente, o bien, varios iones están compartiendo un mismo sitio de adsorción, mientras que para el arsénico se confirma el efecto de aglomeración superficial (Amrhar et al., 2021; Nafair et al., 2025). El parámetro $C_{1/2}$ refleja que el adsorbente tiene mayor afinidad por los fluoruros que por el arsénico, y claramente el valor de dicho parámetro considerablemente cuando hay otros iones en el medio (Nafair et al., 2025). Finalmente, los valores del parámetro N_0 (0.11 – 0.25) indican que la ocupación promedio de los sitios de adsorción es baja (Desgranges et al., 2012).

Tabla 4.2. Parámetros obtenidos para la adsorción de arsénico y fluoruros empleando el modelo de adsorción monocapa con una energía de adsorción.

Adsorbato	Temperatura, °C	Sistema	Nm	n	C _{1/2}	N ₀	R ²
Arsénico	30	Solución acuosa	0.39	1.59	2.18E-3	0.19	0.98
	40		0.25	2.60	1.88E-4	0.13	0.97
	30	Agua potable	0.50	1.24	0.02	0.25	0.99
Fluoruros	30	Solución acuosa	0.24	3.11	2.80	0.11	0.99
	40		0.25	2.95	2.58	0.13	0.99
	30	Agua potable	0.45	1.38	3.40	0.22	0.99

4.2 Caracterización fisicoquímica del adsorbente CFe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros.

Los espectros de infrarrojo del adsorbente CFe-DMF antes y después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros se reportan en la Figura 4.3. La banda de absorción en $\sim 3600 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ resulta de la vibración de estiramiento del grupo OH (Liu et al., 2025), mientras que entre $\sim 2950 - 2850 \text{ cm}^{-1}$ se identifican las bandas de absorción correspondientes las vibraciones C-H que usualmente se relacionan con los grupos funcionales del solvente (DMF) utilizado en la síntesis del material (Hadjiivanov et al., 2021). Las bandas de absorción en ~ 1700 , ~ 1461 y $\sim 1390 \text{ cm}^{-1}$ se atribuyen a vibraciones de estiramiento C=O de los grupos carboxilo, y vibraciones asimétricas y simétricas del grupo O-C-O (Agostini et al., 2022). En $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ se identifican las vibraciones C-H de los grupos carboxilato en los anillos de benceno, mientras que en ~ 780 y $\sim 650 \text{ cm}^{-1}$ se hacen presentes las vibraciones fuera del plano de los compuestos aromáticos con doble sustitución (Hadjiivanov et al., 2021). Por otra parte, las bandas de absorción situadas en ~ 1570 y $\sim 1390 \text{ cm}^{-1}$ se pueden relacionan con vibraciones de estiramiento asimétricas y simétricas O-C=O de los grupos carboxílicos presentes en el ácido tereftálico (Liu et al., 2021; Agostini et al., 2022; Agustin et al., 2024). También se identifica la vibración de flexión C-H (740 cm^{-1}) perteneciente al anillo aromático del benceno dicarboxílico (Hadjiivanov et al., 2021). Finalmente, la banda de absorción en $\sim 545 \text{ cm}^{-1}$ es característica de la vibración de estiramiento Fe-O (Liu et al., 2021). Cabe destacar que las bandas de absorción en ~ 1700 , ~ 1570 , ~ 1390 , ~ 1100 y $\sim 545 \text{ cm}^{-1}$ son características de materiales organometálicos obtenidos a partir de ácido tereftálico y hierro (Liu et al., 2021). Por lo que estos resultados sugieren la síntesis exitosa del adsorbente.

Después del proceso de remoción de arsénico se observa un desplazamiento en las bandas de absorción del grupo carboxilo (O-C=O), y la aparición de una banda de absorción intensa en $\sim 1380 \text{ cm}^{-1}$ debido a la formación de enlaces As-O (Shan et al., 2022). Además, se identifica un cambio en

la banda de absorción Fe-O, indicando la posible formación de enlaces O-Fe-As (Wang et al., 2022b). Por otra parte, después de la adsorción de fluoruros también se observa un desplazamiento en la banda de adsorción del grupo carboxilo, y la presencia de enlaces O-Fe-F ($\sim 644\text{ cm}^{-1}$) y Fe-F ($\sim 460\text{ cm}^{-1}$) (Zhou et al., 2022). Este indicativo sugiere que el nodo metálico participa en la adsorción de los contaminantes.

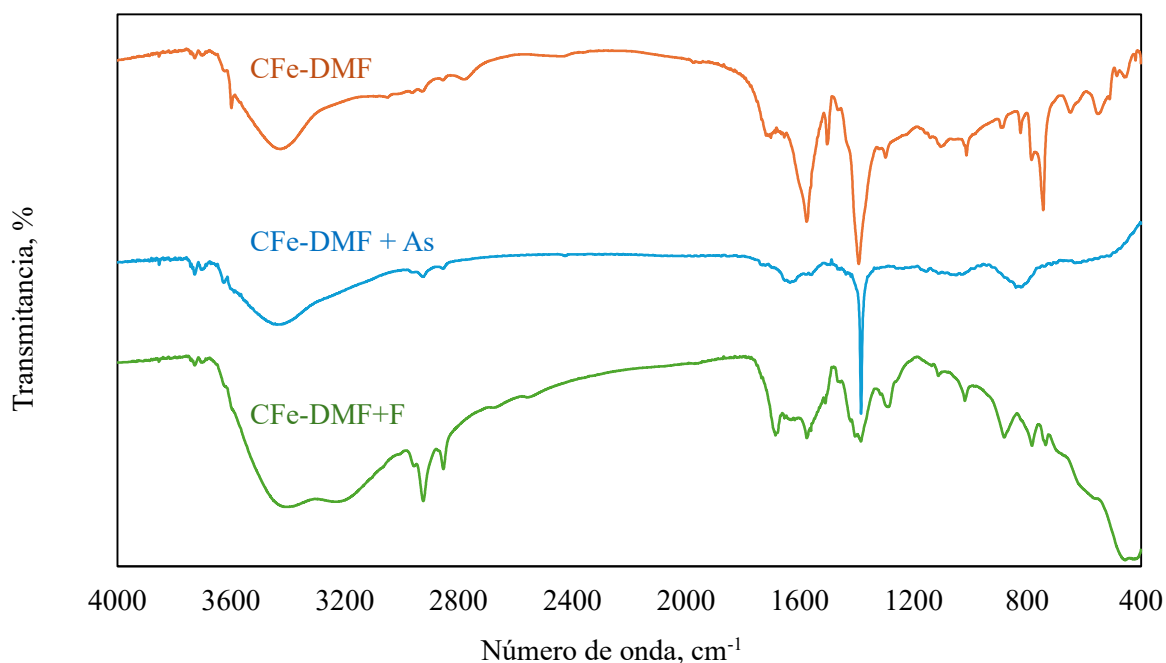


Figura 4.3. Espectros de infrarrojo del adsorbente CFe-DMF antes (—) y después del proceso de adsorción de arsénico (—) y fluoruros (—).

En la Figura 4.4 se presentan los difractogramas de rayos del adsorbente antes y después del proceso de adsorción de los contaminantes estudiados, así como del precursor metálico utilizado en la síntesis. La chatarra de hierro exhibe picos de difracción correspondientes a hierro metálico (COD: 96-411-3932) en 44.7 y $65.1^\circ 2\theta$, mientras que los picos de difracción en 35.5 , 43.1 , 47.2 , 57.1 y $62.6^\circ 2\theta$ se asocian con Fe_3O_4 (ICDD: 01-088-0866), cuya estructura cristalina corresponde a un sistema cúbico. El adsorbente organometálico presenta picos de difracción en 9.4 , 16.6 y $19.5^\circ 2\theta$, los cuales son característicos del MOF MIL-101(Fe) (Liu et al., 2021). Además, se identifica la estructura cristalina de óxido hidróxido tereftalato de hierro (8.9 , 14.1 , 16.0 , 17.7 , 26.7 , 28.8 , 30.6 y $32.7^\circ 2\theta$) (ICDD: 00-033-1724), magnetita (35.5 , 37.1 , 43.1 , 57.0 y $62.6^\circ 2\theta$) (ICSD: 98-015-8741), y tereftalato de dimetilamonio (13.1 , 14.0 , 18 , 19.4 , 21.2 , 21.8 , 24.8 , 26.2 , 39.5 y $40.6^\circ 2\theta$) (COD: 96-221-3117). Por tanto, el adsorbente sintetizado puede considerarse como MOF análogo de dicha familia (Zorainy et al., 2021).

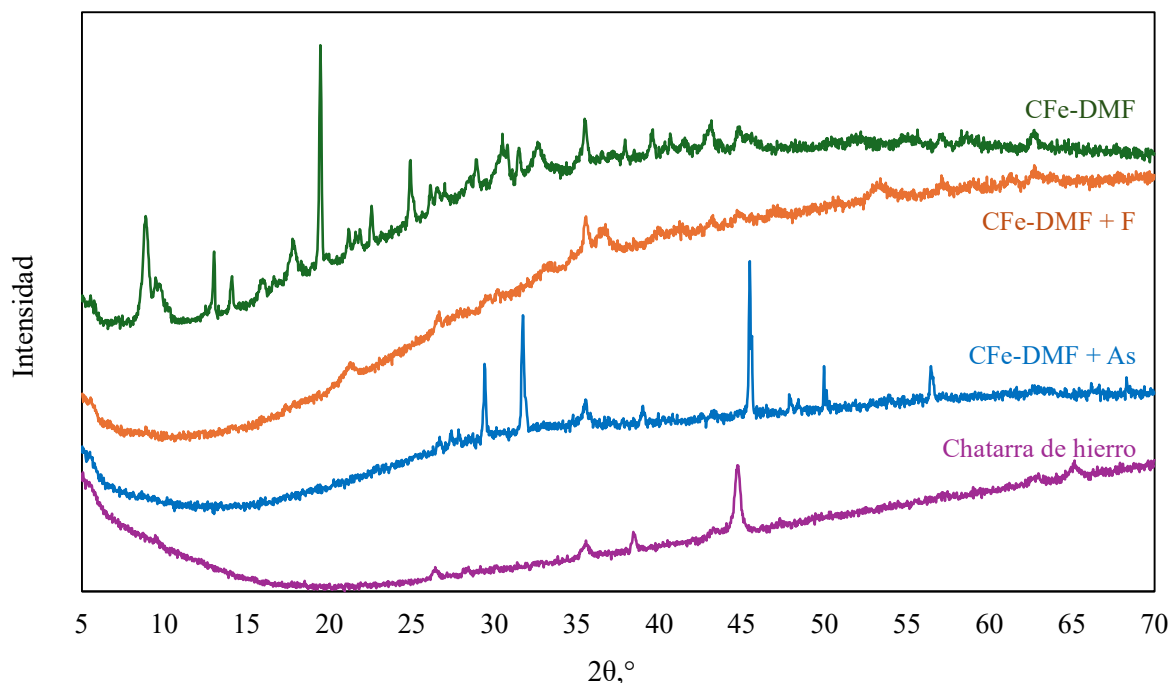


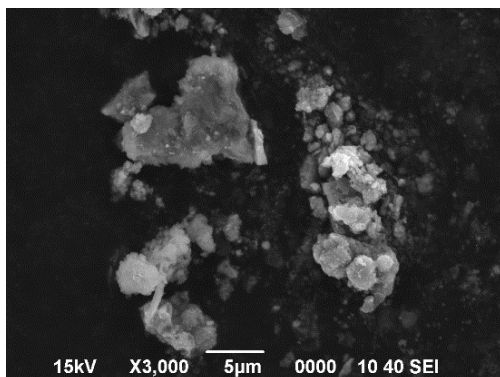
Figura 4.4. Difractogramas de rayos X de la chatarra de hierro (—), y del adsorbente CFe-DMF antes (—) y después del proceso de adsorción de arsénico (—) y fluoruros (—).

Después del proceso de adsorción de arsénico se identifican picos de difracción asociados con la estructura cristalina de la farmacosiderita (27.3, 31.7, 35.5, 39.1, 48.5, 49.9, 53.9, 56.6 y 68.4 °2θ) (ICSD: 98-018-1470). Además, se identifica la presencia de cloruro de sodio (27.3, 31.7, 45.6 y 56.4 °2θ) (ICSD: 98-005-2232) y nitrato de sodio (29.3, 31.7, 35.5, 38.9, 47.9 y 48.4 °2θ) (ICDD: 01-079-2056), que se atribuyen al reactivo utilizado para ajustar el pH inicial de las soluciones de arsénico. En el adsorbente saturado con fluoruros se identifican algunos picos de difracción de la magnetita (35.5, 43.1, 53.4, 57.0 y 62.5 °2θ), y de fluoruro de hierro (26.5, 33.3, 40.0 y 58.9 °2θ). Sin embargo, cabe mencionar que este material presenta poca cristalinidad, probablemente debido a la naturaleza física del proceso de adsorción para este contaminante. Estos resultados confirman que el nodo metálico participa en la remoción de los contaminantes estudiados.

Las micrografías del adsorbente CFe-DMF, obtenidas antes y después de la remoción de arsénico y fluoruros, así como la micrografía de la chatarra utilizada como nodo metálico, se muestran en la Figura 4.5. El precursor (Figura 4.5a) está constituido por partículas aglomeradas de hierro que carecen de una morfología definida, lo que sugiere una estructura poco ordenada. El adsorbente organometálico presenta una estructura heterogénea, y se observa la presencia de partículas de hierro de diferentes tamaños distribuidas de manera uniforme (Figura 4.5b). Como se puede apreciar, dichas

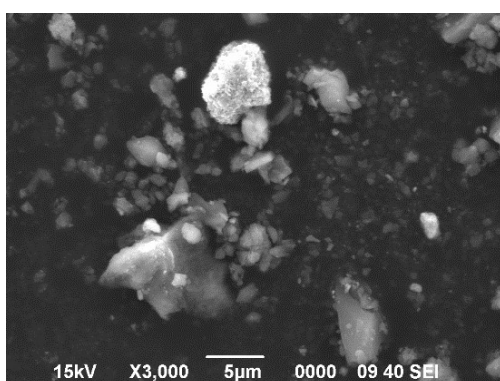
partículas no exhiben la forma octaédrica característica del MOF MIL-101(Fe), lo que podría asociarse con la naturaleza de los precursores utilizados (escoria de hierro y PET).

a)



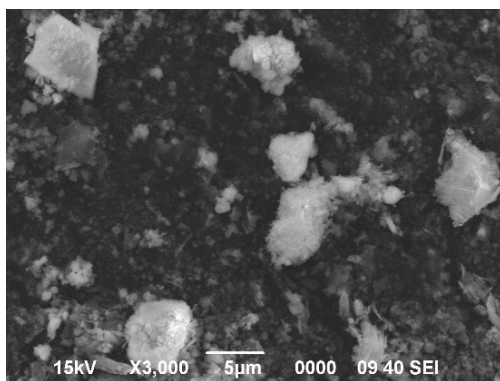
Elemento	% atómico
C	56.67
O	33.63
Fe	9.23
Otros	~0.6

b)



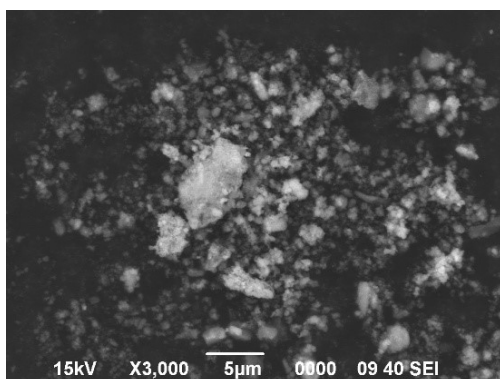
Elemento	% atómico
C	67.05
O	29.74
Fe	3.10
Otros	~0.60

c)



Elemento	% atómico
C	33.20
O	35.14
Fe	5.64
Na	13.32
Cl	9.58
As	2.95
Otros	~0.40

d)



Elemento	% atómico
C	43.74
O	35.50
Fe	10.81
Na	3.24
F	6.28
Otros	~0.70

Figura 4.5. Micrografías electrónicas y análisis elemental de la chatarra de hierro (a), y del adsorbente organometálico antes (b) y después del proceso de adsorción de arsénico (c) y fluoruros (d).

Tras el proceso de adsorción, se observan ligeras modificaciones en la textura y morfología superficial del material organometálicos, atribuibles a su interacción con los iones de arsénico (Figura 4.5c) y fluoruros (Figura 4.5c). Por otra parte, el análisis elemental indicó que tanto la chatarra de hierro como el adsorbente sintetizado están compuestos principalmente por carbono, oxígeno y hierro, y contienen, además, elementos traza como silicio, aluminio, cobre, cromo y manganeso (Figura 4.5a,b). Después del proceso de adsorción se confirma la presencia de los contaminantes geogénicos en la superficie adsorbente (Figura 4.6c,d). Se identifica también la presencia de sodio y cloro en el material saturado con arsénico, atribuible al reactivo utilizado para ajustar el pH inicial de las soluciones. En el adsorbente expuesto a fluoruros, la presencia de sodio se debe a la sal utilizada (NaF) en los experimentos como fuente del anión.

En la Figura 4.6 se presentan las curvas de análisis termogravimétrico (TGA) de la chatarra de hierro, y el adsorbente organometálicos antes y después de la adsorción de arsénico y fluoruros. La curva asociada al residuo metálico presenta zonas en las que se registra un incremento en el peso de la muestra. Este comportamiento puede atribuirse a las interacciones entre el nitrógeno y el hierro, que favorecen la adsorción del gas a temperaturas de (-196 – 250 °C) (Bozso et al., 1977; Straßner et al., 2021). Específicamente, a temperaturas mayores a 285 °C, es posible que se lleve a cabo la formación de nitruros de hierro (Wojciechowski et al., 2022), lo cual explicaría las variaciones observadas en la ganancia de masa. El precursor presentó un residuo final del 99.23%, lo cual indica que aproximadamente un 0.77% de la escoria de hierro corresponde a compuestos volátiles, tales como grasas o aceites residuales. Los resultados también indican que el material contiene grupos OH fuertemente adheridos a la estructura del hierro, ya que las pérdidas de masa entre 50 y 250 °C se pueden asociar con la separación de grupos OH, aunque existe evidencia de que incluso después de someter los óxidos de hierro a temperaturas de 600°C se puede encontrar H₂O (Wolska et al., 1989; Magela da Costa et al., 2013).

En la curva de TGA del adsorbente organometálico (Figura 4.6b) no se observa una pérdida de masa en el rango de temperatura correspondiente a las materias primas utilizadas. La primera disminución de peso se observa entre 90 y 190 °C, y se atribuye a la evaporación del agua y de los solventes residuales atrapados en la estructura organometálica (Liu et al., 2021). La segunda etapa de degradación se distingue entre 200 y 330 °C, y se asocia con la descomposición de tereftalatos libres. La pérdida de masa entre 360 y 540 °C, se relaciona con el colapso de los enlaces de coordinación característicos de las estructuras organometálicas pertenecientes a la familia MIL-101 (Liu et al., 2021). Entre 600 y 670 °C se observa una degradación adicional, que puede atribuirse a una fase estructural más estable derivada de la sustitución parcial o total de los nodos metálicos por cadenas o láminas metálicas, generando una configuración más robusta frente a la descomposición térmica.

(Healy et al., 2020). El residuo final representa el 38.85 % de la masa inicial. Es importante destacar que, considerando los intervalos de degradación observados, cerca de una tercera parte del material parece ser tereftalato libre que no logró formar enlaces de coordinación con los nodos metálicos.

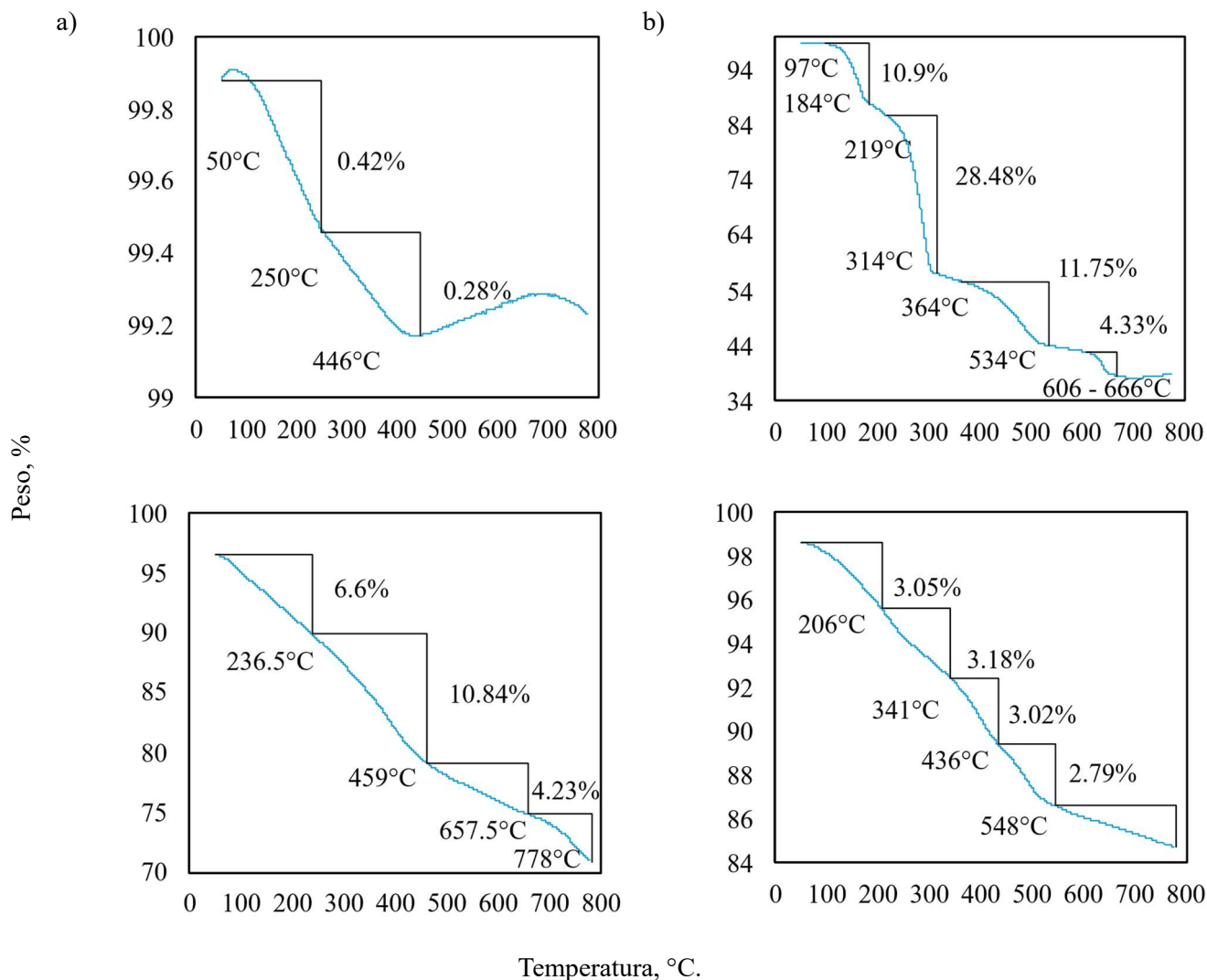


Figura 4.6. Curvas TGA de la chatarra de hierro (a), y del adsorbente organometálico antes (b) y después del proceso de adsorción de arsénico (d) y fluoruros (e).

Las curvas de TGA del adsorbente saturado con arsénico (Figura 4.6c) y fluoruros (Figura 4.6d) presentan un comportamiento de degradación térmica distinto al del adsorbente organometálico. Pese a que se identifican las etapas iniciales de pérdida de masa asociadas con la eliminación de agua y los solventes atrapados en la estructura del material, hay una reducción significativa en la cantidad total de material volatilizado. Específicamente, el residuo final pasa de ~39% a 70 y 84% después de la remoción de arsénico y fluoruros, respectivamente, debido a la posible pérdida de componentes

orgánicos susceptibles a la degradación térmica (p.ej. tereftalatos libres) y/o por la fuerte interacción de especies metálicas y aniónicas. Estos resultados sugieren que dichas interacciones modifican la composición química superficial del material, e inducen una transformación estructural que incrementa su estabilidad térmica global (Jiang et al., 2025). En la curva de TGA del adsorbente saturado con arsénico también se identifica que la degradación del nitrato de sodio ocurre en dos etapas. La primera etapa se presenta alrededor de los 250 °C, mientras que la segunda y más pronunciada, se observa entre 400 y 600 °C (Orozco et al., 2021). Finalmente, la descomposición de los iones de arsénico puede ocurrir entre 200 y 400 °C (Gmar et al., 2022).

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las capacidades de adsorción de los fluoruros son superiores a las del arsénico. Una posible explicación de este comportamiento radica en una mayor afinidad del adsorbente por los fluoruros, ya que al tener un tamaño iónico menor que el arseniato, puede aproximarse con mayor facilidad y debido a su alta electronegatividad se favorecen las interacciones adsorbente-adsorbato. Por el contrario, el arsénico tiende a formar complejos que ocupan un mayor número de sitios activos, y pueden afectar la carga electrostática del adsorbente. El análisis termodinámico y estérico evidenció que la temperatura ejerce una influencia positiva sobre la remoción de ambos contaminantes. Por otro lado, se confirmó que en sistemas reales de agua potable la eficiencia de remoción del adsorbente se ve afectada debido a la presencia de múltiples iones. Los resultados de caracterización sugieren que el nodo metálico (hierro) participa en la adsorción de los contaminantes estudiados. Específicamente, se identificaron picos de difracción asociados con la estructura cristalina de la farmacosiderita y de fluoruro de hierro después del proceso de adsorción de arsénico y fluoruros respectivamente.

Con base en estos resultados, se concluye que la escoria de hierro es una materia prima alternativa, sostenible y de bajo costo para la síntesis de adsorbentes organometálicos análogos al MOF MIL-101(Fe). El aprovechamiento de residuos metálicos contribuye a reducir el impacto ambiental asociado con su disposición final, por lo que se contribuye al objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 12 “Consumo y producción responsables”. A su vez, este enfoque tiene un impacto directo y positivo con el objetivo ODS6 (Agua Limpia y Saneamiento) ya que dicho adsorbente es una alternativa efectiva para el tratamiento de aguas contaminadas con agentes geogénicos tóxicos, como arsénico y fluoruros.

5.2. Recomendaciones

Se sugiere buscar otras fuentes de residuos metálicos que puedan funcionar como nodos para sintetizar materiales organometálicos análogos. Se recomienda realizar estudios de adsorción en sistema multicomponentes para evaluar la influencia de otros iones como fosfatos, sulfatos y bicarbonatos sobre la capacidad de adsorción del material. Evaluar el efecto de otros parámetros como pH, fuerza iónica y contenido de materia orgánica sobre la capacidad de adsorción. Estudiar el comportamiento del adsorbente bajo ciclos de regeneración a fin de conocer su estabilidad estructural y eficiencia a largo plazo. Explorar la síntesis de adsorbentes organometálicos empleando residuos que contengan diferentes metales, con el objetivo de obtener materiales con cationes multivalentes selectivos para contaminantes específicos.

Bibliografía.

R. Abazari, S. Sanati, A. Morsali, A. M. Kirillov, A. M. Z. Slawin, C. L. Carpenter-Warren. Simultaneous presence of open metal sites and amine groups on a 3D Dy(III)-Metal–Organic Framework catalyst for mild and solvent-free conversion of CO₂ to cyclic carbonates. *Inorganic Chemistry*, 60 (2021) 2056–2067.

M. Q. Abbas, H. Javeria, A. Nazir, Z. Du, B. E. Keshta. Enhanced ibuprofen removal from wastewater using Ni-doped ZIF-67 MOF: Synthesis, characterization, and impact of doping on adsorption performance. *Environmental Functional Materials*. En prensa (2025).

A. Acharya, G. Jeppu, C. R. Girish, B. Prabhu, V. R. Murty, A. S. Martis, S. Ramesh. Adsorption of arsenic and fluoride: Modeling of single and competitive adsorption systems. *Heliyon*, 10 (2024) e31967.

B. Achenbach, A. Yurdusen, N. Stock, G. Maurin, C. Serre. Synthetic aspects and characterization needs in MOF chemistry – from discovery to applications. *Advanced Materials*, 2025 (2025) 2411359.

M. Afkhami-Ardekani, M. R. Naimi-Jamal, S. Doae, S. Rostamnia. Solvent-free mechanochemical preparation of Metal-Organic Framework ZIF-67 impregnated by Pt nanoparticles for water purification. *Catalysts*, 13 (2022) 9.

I. Agostini, B. Ciuffi, R. Gallorini, A. M. Rizzo, Chiaramonti, D. & Rosi, L. Recovery of terephthalic acid from densified post-consumer plastic mix by HTL process. *Molecules*, 27 (2022) 7112.

A. R. Agustin, K. Tamura. Surface modification of TiO₂ nanoparticles with terephthalic acid in supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 174 (2021) 105245.

M. Ahmed, T. Kuwabara. Influence of phosphate on arsenic adsorption behavior of Si-Fe-Mg mixed hydrous oxide. *Toxics*, 12 (2024). 280.

A. M. Al-Enizi, A. Nafady, N. B. Alanazi, Moydeen M. Abdulhameed, S. F. Shaikh. Waste polyethylene terephthalate plastic derived Zn-MOF for high performance supercapacitor application. *Journal of King Saud University - Science*, 36 (2024) 103179.

M. A. Al-Ghouti, D. A. Da'ana. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393 (2020) 122383.

J. Alić, M. Schlegel, F. Emmerling, T. Stolar. Meeting the UN sustainable development goals with mechanochemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 63 (2024) e202414745.

A. Almahri, M. Morad, M. M. Aljohani, N. M. Alatawi, F. A. Saad, H. M. Abumelha, M. G. El-Desouky, A. A. El-Bindary. Atrazine reclamation from an aqueous environment using a ruthenium-based Metal-Organic Framework. *Process Safety and Environmental Protection*, 177 (2023) 52–68.

W. A. H. Altowayti, N. Othman, S. Shahir, A. F. Alshalif, A. A. Al-Gheethi, F. A. H. AL-Towayti, Z. M. Saleh, S. A. Haris. Removal of arsenic from wastewater by using different technologies and adsorbents: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (2022) 9243–9266.

O. Amrhar, L. el Gana, M. Mobarak. Calculation of adsorption isotherms by statistical physics models: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19 (2021) 4519–4547.

P. Apel, F. Lamkarkach, R. Lange, F. Sissoko, M. David, C. Rousselle, G. Schoeters, M. Kolossa-Gehring. Human biomonitoring guidance values (HBM-GVs) for priority substances under the HBM4EU initiative - New values derivation for deltamethrin and cyfluthrin and overall results. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 248 (2023) 114097.

M. Babapour, M. Hadi Dehghani, M. Alimohammadi, M. Moghadam Arjmand, M. Salari, L. Rasuli, N. M. Mubarak, N. Ahmad Khan. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution using mesoporous Metal-Organic Framework-5 functionalized with the amino acids: Characterization, optimization, linear and nonlinear kinetic models. *Journal of Molecular Liquids*, 345 (2022) 117835.

J. Beamish-Cook, K. Shankland, C. A. Murray, P. Vaqueiro. Insights into the mechanochemical synthesis of MOF-74. *Crystal growth & design*, 21 (2021) 3047–3055.

M. Beydaghdari, F. Hooriabad Saboor, A. Babapoor, V. Karve, M. Asgari. Recent advances in MOF-Based Adsorbents for dye removal from the aquatic environment. *Energies*, 15 (2022) 2023.

P. Bhakat, A. Nigam, S. Jagtap. Green synthesis of MOF nanostructures: environmental benefits and applications. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 8 (2023), 815–827.

F. Bigdeli, M. N. A. Fetzer, B. Nis, A. Morsali, C. Janiak. Coordination modulation: a way to improve the properties of metal–organic frameworks. *Journal of Materials Chemistry A*, 11 (2023), 22105–22131.

E. Binaeian, H. Nabipour, S. Ahmadi, S. Rohani. The green synthesis and applications of biological metal–organic frameworks for targeted drug delivery and tumor treatments. *Journal of Materials Chemistry B* 11 (2023) 11426–11459.

L. Biswal, J. E. Goodwill, C. Janiak, S. Chatterjee. Versatility, cost analysis, and scale-up in fluoride and arsenic removal using Metal-organic Framework-based adsorbents. *Separation & Purification Reviews*, 51 (2022) 408–426.

F. Bozso, G. Ertl, M. Grunze, M. Weiss. Interaction of nitrogen with iron surfaces I. Fe(100) and Fe(111). *Journal of Catalysis*, 49 (1977) 18–41.

V. v. Butova, I. A. Pankin, O. A. Burachevskaya, K. S. Vetlitsyna-Novikova, A. v. Soldatov. New fast synthesis of MOF-801 for water and hydrogen storage: Modulator effect and recycling options. *Inorganica Chimica Acta*, 514, (2021) 120025.

D. Chakraborty, A. Yurdusen, G. Mouchaham, F. Nouar, C. Serre. Large-scale production of Metal–Organic Frameworks. *Advanced Functional Materials*, 34 (2024) 2309089.

Z. Chen, M. R. Mian, S.-J. Lee, H3 Chen, X. Zhang, K. O. Kirlikovali, S. Shulda, P. Melix, A. S. Rosen, P. A. Parilla, T. Gennett, R. Q. Snurr, T. Islamoglu, T. Yildirim, O. K. Farha Fine-tuning a robust Metal–Organic Framework toward enhanced clean energy gas storage. *Journal of the American Chemical Society*, 143 (2021a). 18838–18843.

Z. Chen, M. C. Wasson, R. J. Drout, L. Robison, K. B. Idrees, J. G. Knapp, F. A. Son, X. Zhang, W. Hierse, C. Kühn, S. Marx, B. Hernandez, O. K. Farha. The state of the field: from inception to commercialization of metal–organic frameworks. *Faraday Discussions*, 225 (2021b) 9–69.

S. Cheng, Y. Li, Z. Yu, R. Gu, W. Wu, Y. Su. Waste PET-derived MOF-5 for high-efficiency removal of tetracycline. *Separation and Purification Technology*. 339 (2024) 126490.

R. J. J. Chia, W. J. Lau, N. Yusof, A. F. Ismail. Synthesis of novel benzoic acid modified metal organic framework for adsorptive removal of arsenate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (2023) 110688.

C. Chinglenthoba, G. Mahadevan, J. Zuo, T. Prathyumnann, S. Valiyaveetil. Conversion of PET bottle waste into a terephthalic acid-based metal-organic framework for removing plastic nanoparticles from water. *Nanomaterials*, 14 (2024) 257.

A. Citarella, A. Amenta, D. Passarella, N. Micale. Cyrene: A green solvent for the synthesis of bioactive molecules and functional biomaterials. *International Journal of Molecular Sciences* 23 (2022) 15960.

M. Cognet, J. Condomines, J. Cambedouzou, S. Madhavi, M. Carboni, D. Meyer. An original recycling method for Li-ion batteries through large scale production of metal organic frameworks. *Journal of Hazardous Materials*. 385 (2020) 121603.

CONAGUA. Indicadores de la calidad del agua subterránea a nivel nacional 2012-2024. (2025).

W.-J. Cong, S. Nanda, H. Li, Z. Fang, A. K. Dalai, J. A. Kozinski. Metal–organic framework-based functional catalytic materials for biodiesel production: a review. *Green Chemistry*, 23 (2021) 2595–2618.

L. Cosimbescu, D. R. Merkel, J. Darsell, G. Petrossian. Simple but tricky: Investigations of terephthalic acid purity obtained from mixed PET waste. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 60 (2021) 12792–12797.

A. Contini, M. Jendrlin, V. Zholobenko. A new type of acidic OH-groups in the LTL zeolite. *Crystals*, 14 (2024) 745.

H. Dai, X. Yuan, L. Jiang, H. Wang, J. Zhang, J. Zhang, T. Xiong. Recent advances on ZIF- 8 composites for adsorption and photocatalytic wastewater pollutant removal: Fabrication, applications and perspective. *Coordination Chemistry Reviews*, 441 (2021) 213985.

W. P. R. Deleu, I. Stassen, D. Jonckheere, R. Ameloot, D. E. de Vos, Waste PET (bottles) as a resource or substrate for MOF synthesis. *Journal of Materials Chemistry A*, 4 (2016). 9519–9525.

H. Demir, S. Keskin. A new era of modeling MOF-based membranes: Cooperation of theory and data science. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309 (2024) 2300225.

F. Demir Duman, A. Monaco, R. Foulkes, C. R. Becer, R. S. Forgan. Glycopolymer-functionalized MOF-808 nanoparticles as a cancer-targeted dual drug delivery system for carboplatin and floxuridine. *ACS Applied Nano Materials*, 5 (2022) 13862–13873.

H. H. Do, C. C. Nguyen, D. L. T. Nguyen, S. H. Ahn, S. Y. Kim, Q. van. Le. MOF-derived NiSe₂ nanoparticles grown on carbon fiber as a binder-free and efficient catalyst for hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (2022) 41587–41595.

S. Duan, S. Shen, G. Li, X. Ling, P. Shen. Statistical physics modelling of adsorption isotherms of water vapour on shale: Stereographic, energetic and thermodynamic investigations. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 19 (2024) e3062.

E.-S. M. El-Sayed, D. Yuan. Waste to MOFs: sustainable linker, metal, and solvent sources for value-added MOF synthesis and applications. *Green Chemistry*, 22 (2020) 4082–4104.

N. A. Esmaili, B. Ramavandi, Z. Bonyadi. Review on the utilization of metal organic frameworks (MOFs) for eliminating ibuprofen and naproxen from water sources. *Environmental Science and Pollution Research*. En prensa (2025).

X. Feng, P. Ji, Z. Li, T. Drake, P. Oliveres, E. Y. Chen, Y. Song, C. Wang, W. Lin. Aluminum hydroxide secondary building units in a Metal–Organic Framework support earth-abundant metal catalysts for broad-scope organic transformations. *ACS Catalysis*, 9 (2019) 3327–3337.

J. Feng, G. Zhi, X. Qi, M. Geng. Efficient Adsorption of arsenic from smelting wastewater by CoMn-MOF-74 bimetallic composites. *Sustainability*, 17 (2025) 3060.

R. Freund, O. Zaremba, G. Arnauts, R. Ameloot, G. Skorupskii, M. Dincă, A. Bavykina, J. Gascon, A. Ejsmont, J. Goscińska, M. Kalmutzki, U. Lächelt, E. Ploetz, C. S. Diercks, S. Wuttke. The current status of MOF and COF applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 60 (2021) 23975–24001.

- S. Gaikwad, Y. Kim, R. Gaikwad, S. Han. Enhanced CO₂ capture capacity of amine-functionalized MOF-177 metal organic framework. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (2021) 105523.
- M. Geng, X. Qi, J. Feng. Efficient removal of As from industrial wastewater by nanocomposite MnFe₂O₄@Fe-Uio-67. *Toxics*, 13 (2025) 295.
- A. Ghosh, G. Das. Green synthesis of Sn(II)-BDC MOF: Preferential and efficient adsorption of anionic dyes. *Microporous and Mesoporous Materials*. 297 (2020) 110039.
- S. Głowniak, B. Szczęśniak, J. Choma, M. Jaroniec. Mechanochemistry: Toward green synthesis of metal–organic frameworks. *Materials Today*, 46 (2021) 109–124.
- S. Głowniak, B. Szczęśniak, J. Choma, M. Jaroniec. Recent Developments in sonochemical synthesis of nanoporous materials. *Molecules*, 28 (2023) 2639.
- M. Gmar, H. Bouafif, | B. Bouslimi, F. L. Braghiroli, A. Koubaa. Pyrolysis of chromated copper arsenate-treated wood: Investigation of temperature, granulometry, biochar yield, and metal pathways. *Energies*, 15 (2022) 5071.
- G. Górtazar, D. Fernández-González, C. Montoro, J. F. Romero, A. Dafinov, A. Jiménez, I. Jiménez-Morales, A. Bogeat-Barroso, F. Zamora, M. G. Álvarez, E. López-Maya. Holistic green synthesis at room temperature of MIL-53(Al) from aluminum slag and application for glucose conversion to 5-hydroxymethylfurfural. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 46 (2025) 102060.
- P. Goyal, A. Paruthi, D. Menon, R. Behara, A. Jaiswal, V, K. A. Kumar, V. Krishnan, S. K. Misra. Fe doped bimetallic HKUST-1 MOF with enhanced water stability for trapping Pb(II) with high adsorption capacity. *Chemical Engineering Journal*, 430 (2022) 133088.
- X. Guan, Q. Li, T. Maimaiti, S. Lan, P. Ouyang, B. Ouyang, X. Wu, S.-T. Yang. Toxicity and photosynthetic inhibition of metal-organic framework MOF-199 to pea seedlings. *Journal of Hazardous Materials*, 409 (2021) 124521.
- H. Guo, D. Stüben, Z. Berner. Adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science*, 315 (2007) 47–53.
- K. I. Hadjiivanov, D. A. Panayotov, M. Y. Mihaylov, E. Z. Ivanova, K. K. Chakarova, S. M. Andonova, N. L. Drenchev. Power of infrared and Raman spectroscopies to characterize metal-organic frameworks and investigate their interaction with guest molecules. *Chemical Reviews*, 121 (2021) 1286–1424.
- A. Haleem, M. Ullah, S. ur, Rehman, A. Shah, M. Farooq, T. Saeed, I. Ullah, H. Li. In-depth photocatalytic degradation mechanism of the extensively used dyes malachite green, methylene blue, congo red, and rhodamine B via Covalent Organic Framework-based photocatalysts. *Water*, 16 (2024) 1588.

A. Hayat, S. Rauf, B. al Alwan, A. el Jery, N. Almuqati, S. Melhi, M. A. Amin, Y. Al-Hadeethi, M. Sohail, Y. Orooji, W. Lv. Recent advance in MOFs and MOF-based composites: synthesis, properties, and applications. *Materials Today Energy*, 41 (2024) 101542.

C. Healy, K. M. Patil, B. H. Wilson, L. Hermanspahn, N. C. Harvey-Reid, B. I. Howard, C. Kleinjan, J. Kolien, F. Payet, S. G. Telfer, P. E. Kruger, T. D. Bennett. The thermal stability of metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews*, 419 (2020) 213388.

M. Hossien Saghi, B. Chabot, S. Rezania, M. Sillanpää, Akbar A. Mohammadi, M. Shams, A. Alahabadi. (2021). Water-stable zirconium and iron-based metal-organic frameworks (MOFs) as fluoride scavengers in aqueous medium. *Separation and Purification Technology*, 270 (2021) 118645.

S. Hu, H. Fu, J. Fu. Distinct effects of Fe^{3+} on the adsorption of chromate and arsenate: A comparison of iron-bearing ferrihydrite and nano- TiO_2 absorbents. *Environmental Technology & Innovation*, 32 (2023) 103418.

P. Huang, X. Qi, X. Duan, W. Jiang, N. Yang, G. Zhi, J. Wang. Efficient arsenate capture using mixed-metal La/Zr-MOF internal complexation. *New Journal of Chemistry*, 48 (2024) 5311–5325.

I. Jahan, T. H. Rupam, M. L. Palash K. A. Rocky B. B. Saha. Energy efficient green synthesized MOF-801 for adsorption cooling applications. *Journal of Molecular Liquids*. 345 (2022) 117760.

J. S. Jeyaprakash, M. Rajamani, C. L. Bianchi, M. Ashokkumar, B. Neppolian. Highly efficient ultrasound-driven Cu-MOF/ ZnWO_4 heterostructure: An efficient visible-light photocatalyst with robust stability for complete degradation of tetracycline. *Ultrasonics Sonochemistry*, 100, (2023) 106624.

A. Jeyaseelan, Mu. Naushad, N. Viswanathan. Development of multivalent metal-ion-fabricated fumaric acid-based metal–organic frameworks for defluoridation of water. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65 (2020) 2990–3001.

A. Jeyaseelan, Mu. Naushad, T. Ahamad, N. Viswanathan, (2021). Design and development of amine functionalized iron based metal organic frameworks for selective fluoride removal from water environment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (2021) 104563.

K. Jiang, W. Ni, X. Cao, L. Zhang, S. Lin. A nanosized anionic MOF with rich thiadiazole groups for controlled oral drug delivery. *Materials Today Bio*, 13 (2022) 100180.

W. Jiang, X. Qi, P. Huang, S. Zhang. Highly efficient arsenate adsorption removal from wastewater based on activated carbon-iron based metal organic framework in situ grown composites. *Materials Science and Engineering: B*, 313 (2025) 117927.

A. Jordan, C. G. J. Hall, L. R. Thorp, H. F. Sneddon. Replacement of less-preferred dipolar aprotic and ethereal solvents in synthetic organic chemistry with more sustainable alternatives. *Chemical Reviews*, 122 (2022) 6749–6794.

T. M. Joseph, S. Azat, Z. Ahmadi, O.M. Jazani, A. Esmaeili, E. Kianfar, J. Haponiuk, S. Thomas. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9 (2024) 100673.

E. Kabir. Application of microwave heating in polymer synthesis: A review. *Results in Chemistry*, 6 (2023) 101178.

B. Karadeniz, A. J. Howarth, T. Stolar, T. Islamoglu, I. Dejanović, M. Tireli, M. C. Wasson, S. Y. Moon, O. K. Farha, T. Frišćić, K. Užarević. Benign by design: Green and scalable synthesis of zirconium UiO-metal–organic frameworks by water-assisted mechanochemistry. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, (2018) 15841–15849.

L. Karam, A. Miglio, S. Specchia, N. el Hassan, P. Massiani, J. Reboul. PET waste as organic linker source for the sustainable preparation of MOF-derived methane dry reforming catalysts. *Materials Advances*, 2 (2021) 2750–2758.

R. Kaur, A. Garkal, L. Sarode, P. Bangar, T. Mehta, D. P. Singh, R. Rawal. Understanding arsenic toxicity: Implications for environmental exposure and human health. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 5 (2024) 100090.

M. Khalooei, M. Torabideh, A. Rajabizadeh, S. Zeinali, H. Abdipour, A. Ahmad, G. Parsaseresht. Evaluating the efficiency of zeolitic imidazolate framework-67(ZIF-67) in elimination of arsenate from aqueous media by response surface methodology. *Results in Chemistry*, 11 (2024) 101811.

N. Kotov, M. M. Keskitalo, C. M. Johnson. Nano FTIR spectroscopy of liquid water in the –OH stretching region. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 330, (2025) 125640.

S. Krishnan, N. S. Zulkapli, H. Kamyab, S. M. Taib, M. F. B. M. Din, Z. A. Majid, S. Chaiprapat, I. Kenzo, Y. Ichikawa, M. Nasrullah, S. Chelliapan, N. Othman. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. *Environmental Technology & Innovation*, 22 (2021) 101525.

S. Kumar, S. Jain, M. Nehra, N. Dilbaghi, G. Marrazza, K.-H. Kim. Green synthesis of metal-organic frameworks: A state-of-the-art review of potential environmental and medical applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 420 (2020) 213407.

Z. Li, X. Liu, W. Jin, Q. Hu, Y. Zhao, (2019). Adsorption behavior of arsenicals on MIL-101(Fe): The role of arsenic chemical structures. *Journal of Colloid and Interface Science*, 554 (2019) 692–704.

Z. Li, T. Zhuang, J. Dong, L. Wang, J. Xia, H. Wang, X. Cui, Z. Wang. Sonochemical fabrication of inorganic nanoparticles for applications in catalysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 71 (2021) 105384.

X. Li, D. Liu, J. Wang, J. Chang, Z. Wang. Experimental study on the recovery of arsenic and iron from arsenic-iron precipitate by carbon thermal magnetization Reduction. *Metals*, 13 (2023) 407.

F. Li, S. Tang, M. Li, P. Xiao, M. Luo, T. Zhao, Green Synthesis of MIL-88B(Cr) with the Co-Modulator of Nitric Acid and Acetic Acid. *Inorganics*, 11 (2023b) 292.

H. Li, J. Lei, L. Zhu, Y. Yao, Y. Li, T. Li, C. Qiu. MOF synthesis using waste PET for applications of adsorption, catalysis and energy storage. *Green Energy & Environment*, 9 (2024a) 1650–1665.

J. Li, S. Zhang, Y. Hua, Y. Lin, X. Wen, E. Mijowska, T. Tang, X. Chen, R. S. Ruoff. Facile synthesis of accordion-like porous carbon from waste PET bottles-based MIL-53(Al) and its application for high-performance Zn-ion capacitor. *Green Energy and Environment*, 9 (2024b) 1138–1150.

Z. Liu, W. He, Q. Zhang, H. Shapour, M. F. Bakhtari. Preparation of a GO/MIL-101(Fe) Composite for the removal of methyl orange from aqueous solution. *ACS Omega*, 6 (2021) 4597–4608.

H. Liu, X. Xie, Y. Wang. Competitive adsorption of arsenate and phosphate on hematite facets: Molecular insights for enhanced arsenic retention. *Water Research*, 271 (2025) 122955.

Q. Lu, Q. Han, J. Li, X. Guan, X. Liu, X. Dang, Z. Xing, X. Wang. Cost-effective and eco-friendly synthesis of MIL-101(Cr)-CS from chromium-containing sludge waste and its exploration of adsorption and dehumidification performance. *Journal of Solid State Chemistry*, 313 (2022) 123348.

L. Luo, Y. Zhou, W. Yan, L. Luo, J. Deng, M. Fan, W. Zhao. In-situ one-step synthesis of activated Carbon@MIL-101 (Cr) composites for hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (2022) 39563–39571.

Y. Luo, Z. Liu, M. Ye, Y. Zhou, R. Su, S. Huang, Y. Chen, X. Dai. Mechanism of enhanced fluoride adsorption using amino-functionalized aluminum-based metal-organic frameworks. *Water*, 16 (2024) 2889.

M. Ma, Y. Bi, Z. Tong, Y. Liu, P. Lyu, R. Wang, Y. Ma, G. Wu, Z. Liao, Y. Chen. Recent progress of MOF-derived porous carbon materials for microwave absorption. *RSC Advances*, 11 (2021) 16572–16591.

G. Magela da costa, K. M. Novack, M. M. C. Elias, C. C. R. Ferreira da cunha. Quantification of moisture contents in iron and manganese ores. *ISIJ International*, 53 (2013) 1732–1738.

M. Y. Masoomi, A. Morsali, A. Dhakshinamoorthy, H. Garcia. Mixed-metal MOFs: Unique opportunities in Metal-Organic Framework (MOF) Functionality and Design. *Angewandte Chemie International Edition*, 58 (2019) 15188–15205.

Md. M. H. Mondol, S. H. Jhung. Adsorptive removal of pesticides from water with metal–organic framework-based materials. *Chemical Engineering Journal*, 421 (2021) 129688.

H. Molavi, M. S. Salimi. Investigation the effect of exchange solvents on the adsorption performances of Ce-MOFs towards organic dyes. *Scientific Reports*, 15 (2025) 7074.

A. Mukherjee, P. Coomar, S. Sarkar, K. H. Johannesson, A. E. Fryar, M. E. Schreiber, K. M. Ahmed, M. A. Alam, P. Bhattacharya, J. Bundschuh, W. Burgess, M. Chakraborty, R. Coyte, A. Farooqi, H. Guo, J. Ijumulana, G. Jeelani, D. Mondal, D. K. Nordstrom, A. Vengosh. Arsenic and other geogenic contaminants in global groundwater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5 (2024) 312–328.

T. Muringayil Joseph, S. Azat, Z. Ahmadi, O. Moini Jazani, A. Esmaceli, E. Kianfar, J. Haponiuk, S. Thomas. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9 (2024) 100673

S. Naghdi, E. Brown, M. Zendeabad, A. Duong, W. Ipsmiller, S. Biswas, M. C. Toroker, H. Kazemian, D. Eder. Glyphosate adsorption from water using hierarchically porous Metal–Organic Frameworks. *Advanced Functional Materials*, 33 (2023) 2213862.

H.-T. T. Nguyen, K.-N. T. Tran, L. van Tan, V. A. Tran, V.-D. Doan, T. Lee, T. D. Nguyen, Microwave-assisted solvothermal synthesis of bimetallic metal-organic framework for efficient photodegradation of organic dyes. *Materials Chemistry and Physics*, 272 (2021) 125040.

T. H. Nguyen, T. V. Nguyen, S. Vigneswaran, N. T. H. Ha, H. Ratnaweera. A review of theoretical knowledge and practical applications of iron-based adsorbents for removing arsenic from water. *Minerals*, 13 (2023) 741.

A. Noura, I. Bekri-Abbes. Depolymerization to decontamination: Transforming PET waste into tailored MOFs for advanced pollutant adsorption. *Physchem*, 5 (2025) 28.

Organización de las Naciones Unidas (26 de enero 2024). Consumo y producción sostenibles - Desarrollo sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production>

M. A. Orozco, K. Acurio, F. Vásquez-Aza, J. Martínez-Gómez, A. Chico-Proano. Thermal storage of nitrate salts as phase change materials (PCMs). *Materials*, 14 (2021) 7223.

D. Panda, S. Patra, M. K. Awasthi, S. K. Singh. Lab cooked MOF for CO₂ capture: A sustainable solution to waste management. *Journal of Chemical Education*, 97 (2020) 1101–1108.

S. A. Patil, N. K. Shrestha, A. I. Inamdar, C. Bathula, J. Jung, S. Hussain, G. Nazir, M. Kaseem, H. Im, H. Kim. Bimetallic Cu/Fe MOF-based nanosheet film via binder-free drop-casting route: A highly efficient urea-electrolysis catalyst. *Nanomaterials*, 12 (2022) 1916.

- N. Pederneira, K. Newport, S. Lawson, A. A. Rownaghi, F. Rezaei. Drug delivery on Mg-MOF-74: The effect of drug solubility on pharmacokinetics. *ACS Applied Bio Materials*, 6 (2023) 2477–2486.
- M. Pérez-Miana, J. U. Reséndiz-Ordóñez, J. Coronas. Solventless synthesis of ZIF-L and ZIF-8 with hydraulic press and high temperature. *Microporous and Mesoporous Materials*, 328 (2021) 111487.
- N. Prasetya, C. Wöll, Removal of diclofenac by adsorption process studied in free-base porphyrin Zr-metal organic frameworks (Zr-MOFs). *RSC Advances*, 13 (2023) 22998–23009.
- Y. Qian, F. Zhang, D. J. Kang, H. Pang. A review of metal–organic framework-based compounds for environmental applications. *Energy & Environmental Materials*, 6 (2023) e12414.
- H. Qin, Y. Lv, K. Nakane. Construction of porous channels in electrospun Bi-MOF/polymer composite fiber membrane for enhanced arsenate removal from water. *Chemical Engineering Journal*, 512 (2025) 162354.
- C. R. Quijia, C. Lima, C. Silva, R. C. Alves, R. Frem, M. Chorilli. Application of MIL-100(Fe) in drug delivery and biomedicine. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 61 (2021) 102217.
- F. G. Quintero-Álvarez, D. I. Mendoza-Castillo, C. K. Rojas-Mayorga, E. García-Hernández, I. A. Aguayo-Villarreal, A. Bonilla-Petriciolet. Mechanism, interfacial interactions and thermodynamics of the monolayer adsorption of trace geogenic pollutants from water using mil metal-organic frameworks: Fluorides and arsenates. *Journal of Molecular Liquids*, 380 (2023) 121665.
- F. G. Quintero-Álvarez, D. I. Mendoza-Castillo, M. Almási, E. García-Hernández, L. Palomino-Asencio, C. Cuautli, C. J. Duran-Valle, M. Adame-Pereira, A. Bonilla-Petriciolet, Lanthanide-based metal-organic frameworks MOF-76 for the depollution of xenobiotics from water: Arsenic and fluoride adsorption properties and multi-anionic mechanism analysis. *Journal of Molecular Structure* 1338 (2025) 142113.
- Z. Qiusheng, L. Xiaoyan, Q. Jin, W. Jing, L. Xuegang, (2015). Porous zirconium alginate beads adsorbent for fluoride adsorption from aqueous solutions. *RSC Advances*, 5 (2015), 2100–2112.
- R. Radadiya, S. Shahabuddin, R. Gaur, A facile approach toward the synthesis of terephthalic acid via aminolytic depolymerization of PET waste and studies on the kinetics of depolymerization. *Journal of Polymer Science*, 61 (2023) 1241–1251.
- A. Radwan, H. Jin, D. He, S. Mu. Design engineering, synthesis protocols, and energy applications of MOF-derived electrocatalysts. *Nano-Micro Letters*, 13 (2021) 132.

M. C. Ribadeneyra, J. King, M. M. Titirici, P. Á. Szilágyi. A facile and sustainable one-pot approach to the aqueous and low-temperature PET-to-UiO-66(Zr) upcycling. *Chemical Communications*, 58 (2022) 1330–1333.

Rimi, P. Kumar, B. Uttam, R. Kumar. Highly efficient cauliflower-like palladium-loaded porous MOF as a robust material for the degradation of organic dyes. *ACS Omega*, 8 (2023) 38895–38904.

J. J. Roy, S. Rarotra, V. Krikstolaityte, K. W. Zhuoran, Y. D. Cindy, X. Y. Tan, M. Carboni, D. Meyer, Q. Yan, M. Srinivasan. Green recycling methods to treat lithium-ion batteries e-waste: A circular approach to sustainability. *Advanced Materials*, 34 (2022) 2103346.

R. Sakthivel, P. Palanisamy, S. K. Selvaraj, Z. A. Baki, S. S. Vijayaraghavalu. $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ metal organic framework as a promising adsorbent for operative exclusion of toxic dyes and herbicide. *Results in Materials*, 21 (2024). 100512.

M. Samimi, M. Zakeri, F. Alobaid, B. Aghel. A brief review of recent results in arsenic adsorption process from aquatic environments by metal-organic frameworks: Classification based on kinetics, isotherms and thermodynamics behaviors. *Nanomaterials*, 13 (2022) 60.

A. Sarwar, J. Wang, M. S. Khan, U. Farooq, N. Riaz, A. Nazir, Q. Mahmood, A. Hashem, A.-B. F. Al-Arjani, A. A. Alqarawi, E. F. Abd_Allah, Iron oxide (Fe_3O_4)-supported SiO_2 magnetic nanocomposites for efficient adsorption of fluoride from drinking water: Synthesis, characterization, and adsorption isotherm analysis. *Water*, 13 (2021) 1514.

D. Sengupta, P. Melix, S. Bose, J. Duncan, X. Wang, M. R. Mian, K. O. Kirlikovali, F. Joodaki, T. Islamoglu, T. Yildirim, R. Q. Snurr, O. K. Farha. Air-stable Cu(I) Metal–Organic Framework for hydrogen storage. *Journal of the American Chemical Society*, 145 (2023) 20492–20502.

M. I. Severino, E. Gkaniatsou, F. Nouar, M. L. Pinto, C. Serre. MOFs industrialization: a complete assessment of production costs. *Faraday Discussions*, 231 (2021) 326–341.

S. N. Shankar, D. R. Dinakaran, D. K. Chandran, G. Mantha, B. Srinivasan, U. P. Nyayiru Kannaian. Adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamics of a textile dye V5BN by a natural nanocomplex material: Clinoptilolite. *Energy Nexus*, 10 (2023) 100197.

Y. Shen, A. Tissot, C. Serre. Recent progress on MOF-based optical sensors for VOC sensing. *Chemical Science*. 13 (2022) 13978–14007.

Sigma-Aldrich, Basolite® Z1200 produced by BASF | Sigma-Aldrich. Recuperado Octubre 11 2025a.

S. Singh, Naik, T. S. Sunil Kumar Naik. U. Basavaraju, N. A. Khan, A. B. Wani, S. K. Behera, B. Nath, S. Bhati, J. Singh, P. C. Ramamurthy. A systematic study of arsenic adsorption and removal from aqueous environments using novel graphene oxide functionalized UiO-66-NDC nanocomposites. *Scientific Reports*, 12 (2022) 15802.

K. Song, X. Qiu, B. Han, S. Liang, Z. Lin. Efficient upcycling electroplating sludge and waste PET into Ni-MOF nanocrystals for the effective photoreduction of CO₂. *Environmental Science: Nano*, 8 (2021) 390–398.

A. Straßner, C. Wiehn, M. P. Klein, D. v. Fries, S. Dillinger, J. M. H. Mohrbach, Prosenc, P. B. Armentrout, G. Niedner-Schatteburg. Cryo spectroscopy of N₂ on cationic iron clusters. *The Journal of Chemical Physics*, 155 (2021) 244305.

T. Steenhaut, Y. Filinchuk, S. Hermans. Aluminium-based MIL-100(Al) and MIL-101(Al) metal–organic frameworks, derivative materials and composites: synthesis, structure, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 9 (2021) 21483–21509.

A. Taghipour, A. Rahimpour, M. Rastgar, M. Sadrzadeh. Ultrasonically synthesized MOFs for modification of polymeric membranes: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90 (2022) 106202.

A. K. Tolkou, A. I. Zouboulis. Fluoride Removal from Water Sources by Adsorption on MOFs. *Separations*, 10 (2023) 467.

C. Vaitsis, G. Sourkouni, C. Argirusis. Metal Organic Frameworks (MOFs) and ultrasound: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52 (2019) 106–119.

K. Vellingiri, D. C. W. Tsang, K. H. Kim, A. Deep, T. Dutta, D. W. Boukhvalov. The utilization of zinc recovered from alkaline battery waste as metal precursor in the synthesis of metal-organic framework. *Journal of Cleaner Production*, 199 (2018) 995–1006.

D.M. Venturi, F. Campana, F. Marmottini, F. Costantino, L. Vaccaro. Extensive screening of green solvents for safe and sustainable UiO-66 synthesis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8 (2020) 17154–17164.

H. Viltres, V. Phung, N. Gupta, C. Morera-Boado, A. Mohammadi Sheikhlari, A. Reza Rajabzadeh, S. Srinivasan. Rapid and effective antibiotics elimination from water by Fe-BTB MOF: An insight into adsorption mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 397 (2024) 124105.

D. Villarroel-Rocha, C. García-Carvajal, S. Amaya-Roncancio, J. Villarroel-Rocha, D. A. Torres-Ceron, E. Restrepo-Parra, K. Sapag. MIL-101(Fe)@ceramic-monolith for arsenic removal in aqueous solutions. *Scientific Reports*, 14 (2024) 29622.

S. Virolainen, T. Wesselborg, A. Kaukinen T. Sainio, Removal of iron, aluminium, manganese and copper from leach solutions of lithium-ion battery waste using ion exchange. *Hydrometallurgy*. 202 (2021) 105602.

D. Volkov, O. Rogova, M. Proskurnin. Organic matter and mineral composition of silicate soils: FTIR comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection Modalities. *Agronomy*, 11 (2021) 1879.

T. A. Vu, G. H. Le, C. D. Dao, L. Q. Dang, K. T. Nguyen, Q. K. Nguyen, P. T. Dang, H. T. K. Tran, Q. T. Duong, T. v. Nguyen, G. D. Lee. Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption using novel MIL-53(Fe) as a highly efficient adsorbent. *RSC Advances*, 5 (2015) 5261–5268.

C. Wang, X. Liu, J. P. Chen, K. Li. Superior removal of arsenic from water with zirconium metal-organic framework UiO-66. *Scientific Reports*, 5 (2015) 16613.

X. Wang, K. Liu, H. Zhu, T. Sun, T. Han, J. Li, H. Dai. An effective and selective stable metal-organic framework adsorbent (Al-MOF-5) for the removal of fluoride from water. *Desalination and Water Treatment*, 216 (2021) 220–231.

Y. Wang, C. Wang, H. Shang, M. Yuan, Z. Wu, J. Li, Y. Du. Self-driven Ru-modified NiFe MOF nanosheet as multifunctional electrocatalyst for boosting water and urea electrolysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 605 (2022a) 779–789.

Y. Wang, L. Zhang, C. Guo, Y. Gao, S. Pan, Y. Liu, X. Li, Y. Wang. Arsenic removal performance and mechanism from water on iron hydroxide nanopetalines. *Scientific Reports*, 12 (2022b) 17264.

Y. Wang, M. Dai, G. Luo, J. Fan, J. H. Clark, S. Zhang. Preparation and application of green sustainable solvent Cyrene. *Chemistry*, 5 (2023) 2322–2346.

H. Wen, S. Zhang, T. Yu, Z. Yi, R. Guo. ZIF-67-based catalysts for oxygen evolution reaction. *Nanoscale*, 13 (2021), 12058–12087.

WHO (2017) Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization.

P. Wiśniewska, J. Haponiuk, M. R. Saeb, N. Rabiee, S. A. Bencherif. Mitigating metal-organic framework (MOF) toxicity for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal*, 471 (2023) 144400.

S. Wjihi, E. C. Peres, G. L. Dotto, A. ben. Lamine. Physicochemical assessment of crystal violet adsorption on nanosilica through the infinity multilayer model and sites energy distribution. *Journal of Molecular Liquids*, 280 (2019) 58–63.

P. Wojciechowski, M. Lewandowski. Iron nitride thin films: growth, structure, and properties. *Crystal Growth & Design*, 22 (2022) 4618–4639.

E. Wolska, U. Schwertmann. Nonstoichiometric structures during dehydroxylation of goethite. *Zeitschrift Für Kristallographie - Crystalline Materials*, 189 (1989), 223–237.

K. Xiao, B. Shu, K. Lv, P. Huang, Q. Chang, L. Wu, Wang, S. L. Cao. Recent progress of MIL MOF materials in degradation of organic pollutants by Fenton reaction. *Catalysts*, 13 (2023) 734.

X. Yang, J. Cheng, X. Yang, Y. Xu, W. Sun, J. Zhou. MOF-derived Cu@Cu₂O heterogeneous electrocatalyst with moderate intermediates adsorption for highly selective reduction of CO₂ to methanol. *Chemical Engineering Journal*, 431 (2022) 134171.

J. M. Yassin, A. M. Taddesse, M. Sánchez-Sánchez. Room temperature synthesis of high-quality Ce(IV)-based MOFs in water. *Microporous and Mesoporous Materials*, 324 (2021) 111303.

M. Yusuf, R. Kumar, M. Ali Khan, M. J. Ahmed, M. Otero, S. Muthu Prabhu, M. Son, J. H. Hwang, W. Hyoungh Lee, B. H. Jeon, Metal-organic framework-based composites for biogas and natural gas uptake: An overview of adsorption and storage mechanisms of gaseous fuels. *Chemical Engineering Journal*, 478, (2023) 147302.

A. R. Yuvaraj, A. Jayarama, D. Sharma, S. S. Nagarkar, S. P. Duttagupta, R. Pinto. Role of metal-organic framework in hydrogen gas storage: A critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 59 (2024) 1434–1458

F. Zadehahmadi, N. T. Eden, H. Mahdavi, K. Konstas, J. I. Mardel, M. Shaibani, P. C. Banerjee, M. R. Hill. Removal of metals from water using MOF-based composite adsorbents. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9 (2023) 1305–1330.

A. Zaka, M. W. Iqbal, A. M. Afzal, H. Hassan, H. Rafique, S. M. Wabaidur, A. M. Tawfeek, E. Elahi. A bimetallic Fe–Mg MOF with a dual role as an electrode in asymmetric supercapacitors and an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction (HER). *RSC Advances*, 13 (2023) 26528–26543.

H. G. Zaman, L. Baloo, R. Pendyala, P. Singa, S. Ilyas, S. Kutty. Produced water treatment with conventional adsorbents and MOF as an alternative: A review. *Materials*, 14 (2021) 7607.

X. Zhang, Z. Chen, X. Liu, S. L. Hanna, X. Wang, R. Taheri-Ledari, A. Li, P. Maleki, O. K. Farha, A historical overview of the activation and porosity of metal–organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 49 (2020) 7406–7427.

Z. Zhang, X. Chen, Y. Yu, W. Pan, R. Liu, J. Song, J. Hu. Experimental evaluation and thermodynamic analysis of magnetic Fe₃O₄@La-Zr-MOFs for highly efficient fluoride and phosphate removal. *Nanomaterials*, 15 (2025) 1043.

B. Zhao, Y. Zhang, X. Dou, X. Wu, M. Yang. Granulation of Fe–Al–Ce trimetal hydroxide as a fluoride adsorbent using the extrusion method. *Chemical Engineering Journal*, 185–186 (2012) 211–218.

X. Zhao, C. Zhang, B. Liu, H. Zhao, X. Gao, Y. Wang, Y. Zhang, D. Liu, C. C. Wang. Resource mining from stainless steel pickling wastewater to produce metal-organic frameworks. *Resources, Conservation and Recycling* (2023a) 188.

X. Zhao, X. Gao, T. Yang, Z. Liu, B. Liu. Introducing dense sulfonic acid in metal–organic framework for effective adsorption of radioactive barium ion. *Separation and Purification Technology*, 320 (2023b) 124062.

N. Zhou, X. Guo, C. Ye, L. Yan, W. Gu, X. Wu, Q. Zhou, Y. Yang, X. Wang, Q. Cheng. Enhanced fluoride removal from drinking water in wide pH range using La/Fe/Al oxides loaded rice straw biochar. *Water Supply*, 22 (2022) 779–794

F. Zhou, D. He, G. Ren, H. Yarahmadi. Sustainable conversion of polyethylene plastic bottles into terephthalic acid, synthesis of coated MIL-101 Metal–Organic Framework and catalytic degradation of pollutant dyes. *Scientific Reports*, 14 (2024) 12832.

X.-H. Zhu, C.-X. Yang, X.-P. Yan. Metal-organic framework-801 for efficient removal of fluoride from water. *Microporous and Mesoporous Materials*, 259 (2018) 163–170.

M. Y. Zorainy, M. Gar Alalm, S. Kaliaguine, D. C. Boffito. Revisiting the MIL-101 metal–organic framework: design, synthesis, modifications, advances, and recent applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 9 (2021) 22159–22217.