

© 2025 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 28: 1-16, 2025.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2026.776>

Estructuras metal-orgánicas: síntesis, propiedades y aplicaciones potenciales para la separación de gases y eliminación de contaminantes

Ismael León González-Maldonado^a, Ángel de Jesús Montes-Luna^b
y Griselda Castruita-de León^{c*}

^aCentro de Investigación en Química Aplicada, ^c*SECIHTI-Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Hermosillo # 140, San José de los Cerritos, 25294, Saltillo, Coahuila, México. ^b**Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., Laboratorio de Membranas, Unidad de Materiales # 130, Chuburná de Hidalgo, 97205, Mérida, Yucatán, México. E-mails: *griselda.castruita@ciqa.edu.mx **angel.montes@cicy.mx

RESUMEN

En esta revisión se presentan las características y propiedades de relevancia en las estructuras metal orgánicas (MOFs) y su uso potencial como materiales adsorbentes. Su naturaleza híbrida proviene de la coordinación de los enlaces entre nodos metálicos y ligandos orgánicos de los que resultan estructuras cristalinas bi o tridimensionales altamente porosas y modulables con una amplia área de superficie y grupos funcionales específicos. Estas estructuras son aptas para separar gases y remover compuestos que contaminan el agua, por medio de mecanismos de adsorción y difusión. La amplia disponibilidad de ligandos orgánicos y fuentes de iones metálicos permite el diseño de una diversidad casi finita de MOFs con porosidad y propiedades fisicoquímicas particulares. Se describen sus componentes, y los principales métodos para su síntesis son las rutas solvotermal, la sonoquímica, la mecanoquímica y la electroquímica. Asimismo, se aborda lo más sobresaliente de algunas de sus características, una descripción general que sustenta su importancia en el ámbito de la separación y adsorción de gases industriales y en la remoción de metales pesados y colorantes en un medio acuoso, al aplicarlas como un sólido adsorbente o en forma de membrana.

Palabras clave: estructuras metal-orgánicas, adsorción, separación, colorantes, metales pesados.

Metal-organic frameworks: synthesis, properties and potential applications for gas separation and pollutant removal

ABSTRACT

This review presents the relevant characteristics and properties of metal-organic frameworks (MOFs) and their potential use as adsorbent materials. Their hybrid nature comes from the coordination of bonds between metal nodes and organic ligands, resulting in highly porous and modular two-dimensional or three-dimensional crystalline structures with a large surface area and specific functional groups. These structures are ideal for gas separation and the removal of compounds that pollute water through adsorption and diffusion mechanisms. The wide availability of organic ligands and metal ion sources allows for the design of a virtually infinite variety of MOFs with specific porosity and physicochemical properties. Their components are described, and the main methods for their synthesis—solvothermal, sonochemical, mechanochemical, and electrochemical routes—are outlined. The highlights of some of their characteristics are also addressed, providing an overview that underscores their importance in the field of industrial gas separation and adsorption, as well as in the removal of heavy metals and dyes from aqueous media, when applied as a solid adsorbent or in membrane form.

Keywords: metal-organic frameworks, adsorption, separation, dyes, heavy metals.

INTRODUCCIÓN

El uso de la nanotecnología en el desarrollo de materiales innovadores es con base en las propiedades de estos para cubrir las necesidades del ser humano. Los materiales con porosidad interna y alto grado de ordenamiento son prometedores. En la década de los años 40, Barrer reportó avances en los procesos de obtención de zeolitas sintéticas con propiedades de adsorción debido a su porosidad. En la década de los años 90 aparece el primer material cristalino poroso con tamaño de poro de 1 a 2 nm. Sin embargo, es hasta 1995 que el profesor Yaghi y colaboradores dan a conocer una nueva clase de materiales a los que nombraron estructuras metal-orgánicas (MOFs por sus siglas en inglés, Metal-Organic Frameworks), distinguidas por su porosidad y una amplia área de superficie, resultado de los enlaces formados entre metales y ligandos orgánicos (Villegas-Fernández, Carpio-Granillo, Vargas-Hernández, Zuno-Cruz & Sánchez-Cabrera, 2021). Posterior a ello, se desarrolló una diversidad de MOFs de distinta composición química, lo que determina la aplicación a la que se destinará el material.

Existen varios métodos para la síntesis y control de la morfología y el tamaño de los cristales MOFs. En la Figura 1 se muestra el marco temporal que ofrece una visión general de algunos de los principales métodos de síntesis y aspectos relevantes de su desarrollo (Schukraft & Petit, 2020; Zandehhahmadi *et al.*, 2023). En ese proceso, la nucleación es un fenómeno clave para el desarrollo de estos materiales, ya que facilita el crecimiento de la fase cristalina y la síntesis se ve influida por las siguientes condiciones de reacción: las proporciones molares de los precursores, el pH, el disolvente, los parámetros (tiempo de reacción, temperatura, presión, etc.), que intervienen directamente en la cristalinidad, porosidad, forma y tamaño (McKinstry, Cussen, Fletcher, Patwardhan & Sefcik, 2013).

Una gran diversidad de combinaciones de los centros metálicos y los ligandos orgánicos forman las diferentes clases de MOFs, con nuevas estructuras cristalinas de geometrías únicas, tamaños, volúmenes de poro y características de superficie distintas. En experimentos de síntesis de MOFs llegan a formarse 3D homogéneos, polimorfos, con diferentes topologías estructurales y que difieren solo por la orientación del ligando (Zhang *et al.*, 2018; Panda *et al.*, 2023), (Figura 2).

La estructura jerárquica de las MOFs se describe mediante 4 niveles: (Figura 3); **i)** el primero son los componentes químicos utilizados, una parte orgánica o ligando coordinador (enlazador) y el ion metálico comúnmente llamado nodo, que puede ser monovalente (Cu^+ , Ag^+ , etc.), divalente (Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , etc.), trivalente (Al^{3+} , Sc^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Ga^{3+} , In^{3+}) o tetravalente (Ti^{4+} , Zr^{4+} , Hf^{4+} , Ce^{4+} , etc.), (Yuan, Qin, Lollar & Zhou, 2018); **ii)** el segundo se denomina unidad secundaria y es el sitio de coordinación de múltiples ligandos con un ion metálico. Esta unidad secundaria sirve de plantilla o celda unitaria para el crecimiento de la MOF; **iii)** el tercero abarca los poros y las jaulas (volumen vacío) de la MOF; y **iv)** el cuarto corresponde a la morfología (tamaño, forma y orientación) que depende del crecimiento de la estructura cristalina. Su morfología es versátil, en forma de microesferas, nanoesferas, cubos, hojuelas, varillas y granos de arroz, entre otros.

Las MOFs están divididas en generaciones: **i)** en la primera, el colapso de la estructura es irreversible al eliminar las moléculas huésped que por lo general son moléculas de disolvente; **ii)** en la segunda, las estructuras se mantienen fuertes posterior a la eliminación de la molécula huésped; y **iii)** en la tercera, por su flexibilidad estructural son viables de experimentar modificaciones funcionales, y tienen un comportamiento de

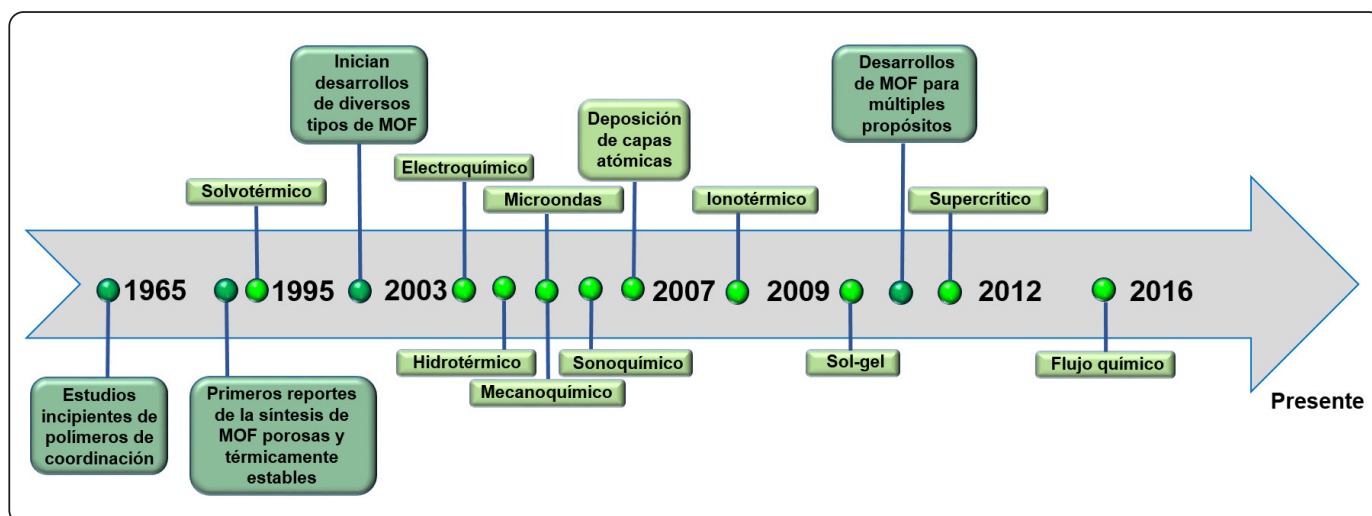


Figura 1. Línea de tiempo del desarrollo de MOFs. [Elaborada por los autores]

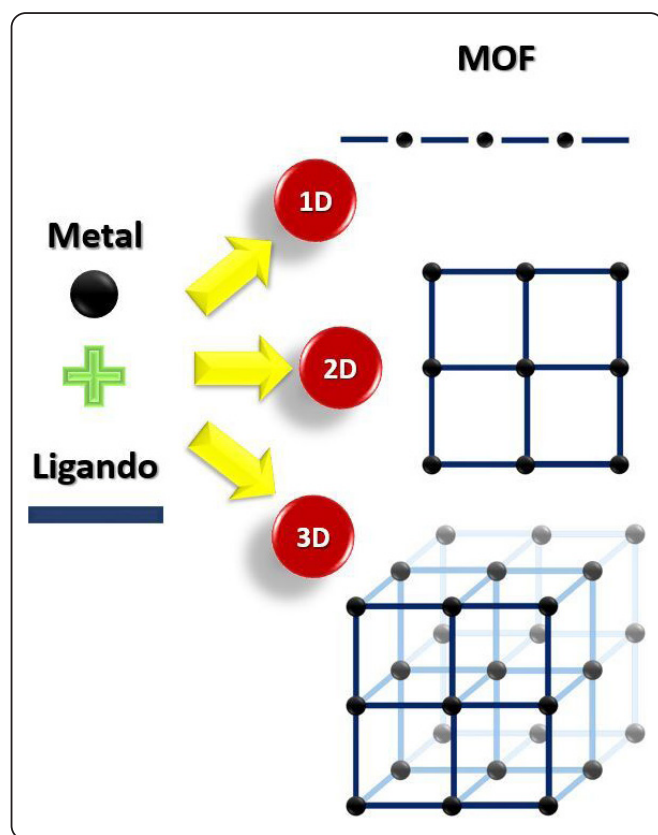


Figura 2. Representación de MOFs 1D, 2D y 3D. [Elaborada por los autores]

adsorción sensible al huésped. En el proceso de formación de las MOFs se producen estructuras tridimensionales, se generan cavidades vacías en la red cristalina conocidas como poros con diámetros uniformes y tamaño entre 3 y 20 Å; el resultado general es de materiales altamente porosos (Villegas-Fernández *et al.*, 2021). También se les clasifica de acuerdo con el tamaño de sus poros en microporosos (<2nm), por capturar sólo moléculas

pequeñas, y en mesoporosos (2-50 nm) por encapsular moléculas de gran tamaño.

Además de la porosidad, las MOFs presentan propiedades físicas de las que sobresale el área superficial interna que ronda valores de 7,000 m²/g hasta 14,600 m²/g con una baja densidad de entre 0.21 a 1.0 g/cm³. Por sus propiedades químicas, es posible controlar y ajustar la estructura mediante los ligandos orgánicos utilizados y por modificaciones químicas con grupos funcionales que proporcionan propiedades específicas. Todas estas características físicas y químicas los convierten en materiales prometedores en procesos y sistemas de separación de gases y líquidos, liberación controlada de fármacos, catálisis y sistemas de censado, etc. (Villegas-Fernández *et al.*, 2021).

La función de las MOFs en diversas aplicaciones se debe principalmente a su componente metálico. En un gran número de investigaciones se menciona que las nanopartículas metálicas de plata, zinc, zirconio, hierro, paladio, cobre, etc., presentan un amplio espectro de desempeño (Lawson, Walton & Chan, 2021); sin embargo, este es mayor en las MOFs en comparación con las nanopartículas metálicas debido a su naturaleza, a las propiedades que proporciona el ligando utilizado y a la porosidad, etc. (Priyadarshini, Das & Ghangrekar, 2020; Zadehahmadi *et al.*, 2023). Una de las ventajas importantes es que son de características maleables, lo que permite intervenir para dar forma a los cristales porosos, en portar los grupos funcionales específicos y obtener las características deseadas. Es por lo anterior, que tienen potenciales aplicaciones en la eliminación de colorantes, la administración de fármacos, el almacenamiento y separación de gases, eliminación de metales pesados y catálisis, etc. (Lalawmpuia, Lalhruaitluangi, Lalmunsiamia & Tiwari, 2024), (Figura 4).

Es por lo expuesto que las MOFs son reconocidas como materiales de alta tendencia en la investigación y atraen la

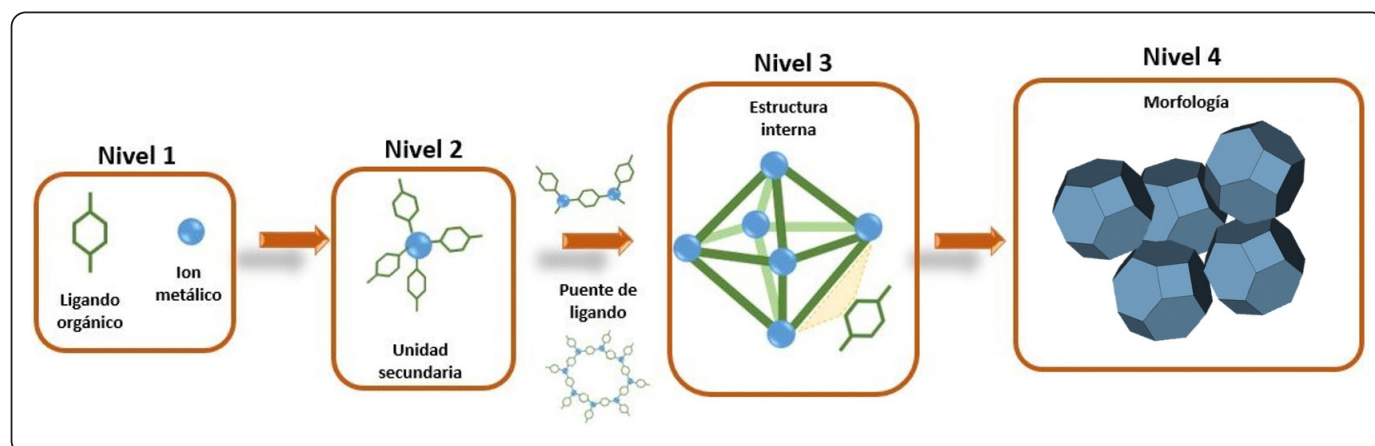


Figura 3. Esquema representativo de la estructura jerárquica de una MOF. [Elaborada por los autores]

atención de la comunidad científica que se refleja en el creciente número de publicaciones de investigaciones realizadas en los últimos años. Desde el año 2000 al 2024 existe un aumento de los trabajos publicados de 68 en el año 2000 a 9,464 en el 2024, y en el inicio del 2025, ya superan los 2,000, lo que muestra el fuerte impacto de estos materiales (Figura 5).

MOFs Y SUS PROPIEDADES

Las MOFs se fabrican a partir de dos unidades de construcción básicas, los nodos centrales basados en metales y los ligandos orgánicos (Perez, Karunaweera, Musselman, Balkus & Ferraris, 2016). Los ligandos orgánicos son ensamblados a través de enlaces covalentes coordinados con los nodos metálicos, crean una estructura cristalina tridimensional con porosidad permanente. La orientación de la arquitectura y de los grupos donantes determinan la estructura final, por lo que el diseño objetivo se logra al ajustar la geometría, el tipo y la longitud del enlace relacionado con el tamaño, forma y propiedades de la superficie interna (Lu *et al.*, 2014).

Los ligandos orgánicos se constituyen en unidades centrales, de extensión y de grupos de unión; los más usados en la síntesis de las MOFs en general consisten en moléculas orgánicas multidentadas con átomos donantes de oxígeno y nitrógeno, incluidos los carboxilatos, los fosfatos, los pirazoles, los tetrazoles, los catecoles y los imidazoles (Ogawa, Kenta, Fukushima & Kajikawa, 2017). En lo que se refiere a los elementos metálicos como conectores centrales, en general, se eligen el cobre, el zinc, el manganeso, el cromo y el cobalto, entre otros. Los iones metálicos presentes en las MOFs participan como ácidos de Lewis y activan el sustrato orgánico unido para las subsecuentes transformaciones orgánicas. Adicional, las cargas positivas parciales de los núcleos metálicos poseen la capacidad de aumentar las propiedades de adsorción (Gangu, Maddila, Mukkamala & Jonnalagadda, 2016; Remya & Kurian, 2019; Elsaidi, Mohamed, Banerjee & Thallapally, 2018).

Los sitios metálicos insaturados presentes en las MOFs tienen una influencia notable en sus propiedades estructurales, acorde

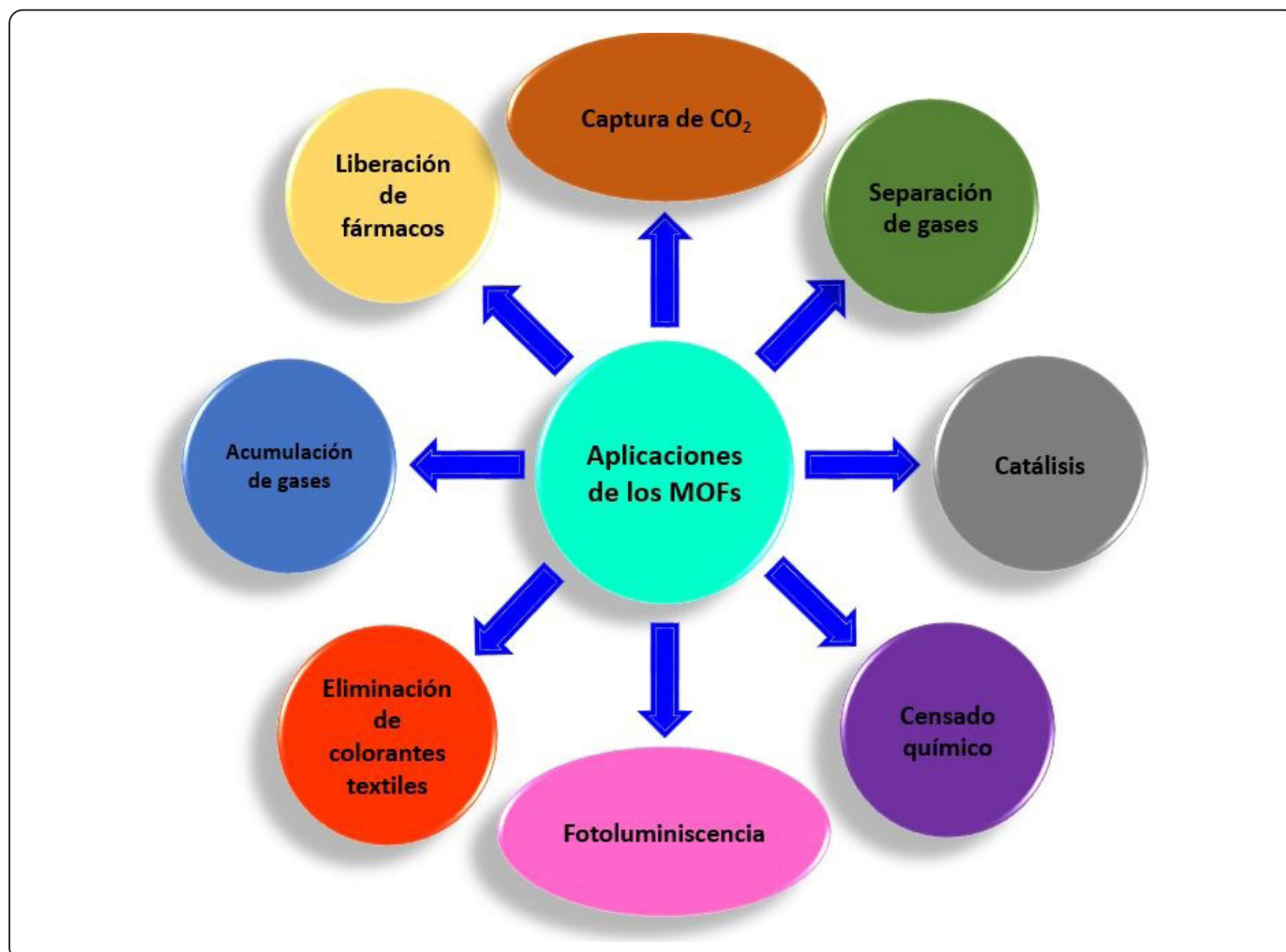


Figura 4. Potenciales aplicaciones de las MOFs. [Elaborada por los autores]

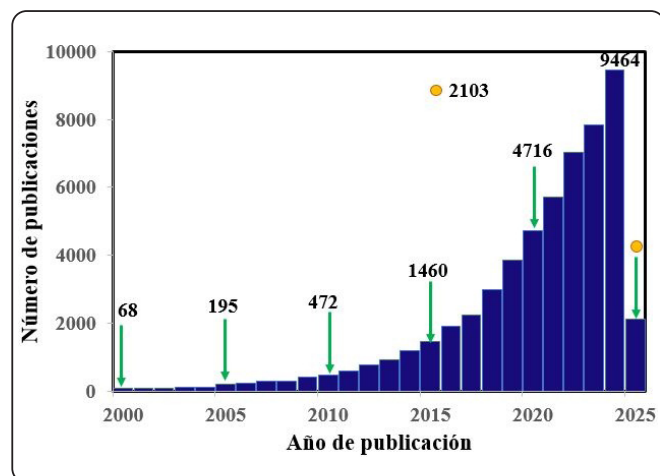


Figura 5. Cantidad de publicaciones anuales de trabajos sobre MOFs reportados a partir de 2000 a 2025 (Búsqueda por tópico MOF en Scopus).

a las características específicas de cada ion metálico como el estado de oxidación, la valencia, la electronegatividad y el tamaño (Villegas-Fernández *et al.*, 2021). Su alta porosidad en el rango de microporoso-mesoporoso, es gracias a los sitios metálicos abiertos y grandes espacios vacíos que dan versatilidad a su morfología, modificada al cambiar la conectividad de la fracción inorgánica y la naturaleza del ligando orgánico, para dar forma a microesferas, nano-esferas, cubos, hojuelas y varillas, entre otros (Perez *et al.*, 2016; Vaitsis, Sourkouni & Argiris, 2019).

Las formas ultra altamente porosas y las grandes áreas de superficie interna resultantes en las MOFs se obtienen a través de la extensión del ligando orgánico que actúa como espaciador para crear la estructura porosa abierta. Lo anterior abre posibilidades a diversas interacciones y a la clasificación de nuevos materiales híbridos porosos cristalinos (Lu *et al.*, 2014; Vaitsis *et al.*, 2019).

Gracias a la unidad de los ligandos hay una integridad estructural, que da pauta a las formas geométricas, al área superficial y al volumen de los poros. La presencia de cadenas alifáticas en los ligandos incrementa la hidrofobicidad, a diferencia de los ligandos que contienen anillos aromáticos que propician un aumento en las interacciones intermoleculares. También disminuye la densidad a valores que rondan los 0.13 g/cm^3 y varía el área superficial específica en un rango de $7,000 \text{ m}^2/\text{g}$, lo que permite nuevas formas de producir materiales con propiedades fisicoquímicas ajustables (Li, Xu, Feng, Hu & Bu, 2016; Ding, Cai & Jiang, 2019; Cui, Li, He, Zhou, Chen & Qian, 2016).

El desarrollo de las MOFs considera la obtención de materiales hidrotérmicos y químicamente estables para su potencial aplicación en catálisis, almacenamiento de gas y purificación

del agua, entre otras. Usualmente, las MOFs suelen tener buena estabilidad hidrotérmica derivada de un aumento en el estado de oxidación del metal elegido y el uso de ligandos orgánicos rígidos. Lo anterior se traduce en un incremento de la acidez de Lewis que da como resultado enlaces de coordinación fuertes, lo que otorga resistencia química. La estabilidad hidrotérmica y química mejora la porosidad y la hidrofobicidad de la superficie de los poros mediante la alteración de los grupos funcionales y la longitud de los ligandos orgánicos (Ramohlola *et al.*, 2018; Canivet, Fateeva, Guo, Coasne & Farrusseng, 2014).

Las MOFs son materiales con potencial en un gran número de aplicaciones, según la naturaleza modular en la construcción del material. La función de estos materiales al modificarse para su aplicación se vale de las siguientes estrategias: **i)** en la primera, los enlaces orgánicos se pre-sintetizan con grupos funcionales específicos; **ii)** en la segunda, el diseño de una MOF mediante una modificación post-sintética (Shade, Marszalek & Walton, 2021; Yin, Wan, Yang, Kurmoo & Zeng, 2019). En la estructura de las MOFs se introducen los siguientes grupos funcionales ácidos: el carboxilo, el nitro, el sulfónico ($-\text{COOH}$, $-\text{NO}_2$ y $-\text{SO}_3\text{H}$) y los grupos básicos: el hidroxilo y el amino ($-\text{OH}$ y $-\text{NH}_2$), importantes para la eliminación de los metales pesados por adsorción y otras aplicaciones (Bao, Li, Ning, Peng, Jin & Tang, 2018; Andriamitantsoa, Wang, Dong, Gao & Wang, 2016). El pH del medio de trabajo determina que los grupos funcionales se ionicen y participen en interacciones electrostáticas, en especial, para la eliminación de las especies contaminantes iónicas (catiónicas y aniónicas). Es importante la mención de que las MOFs lixivian iones metálicos en un medio acuoso, por lo que es necesaria una correcta combinación de los enlaces metal-ligando y la capacidad hidrófoba del ligando para mejorar la resistencia al agua. Las MOFs también tienen una carga superficial. El uso de metales positivos, además de enlaces neutros permite obtener materiales catiónicos con carga concentrada en las esquinas laterales y con los ligandos catiónicos y nodos metálicos se tiene una distribución de carga uniforme en la estructura de las MOFs (Zhou, Ju & Yuan, 2018).

MÉTODOS DE SÍNTESIS

Las MOFs se obtienen por distintos métodos que dan lugar a una variedad de formas y propiedades (Raja *et al.*, 2013; Stock & Biswas, 2012). Entre los más utilizados se encuentran: **i)** el solvotermal; **ii)** el sonoquímico; **iii)** el mecanoquímico y **iv)** el electroquímico (Figura 6). La mayoría de estos se llevan a cabo en fase líquida, al mezclar la sal metálica y el ligando orgánico en un disolvente determinado. Un aspecto clave en la síntesis de las MOFs es el diseño de rutas sintéticas y condiciones de reacción adecuadas para producir bloques de construcción inorgánicos bien definidos sin la descomposición del ligando orgánico. Los parámetros involucrados en el desarrollo de la estructura final son la elección del centro metálico, el ligando orgánico, la concentración de la sal metálica, la solubilidad de

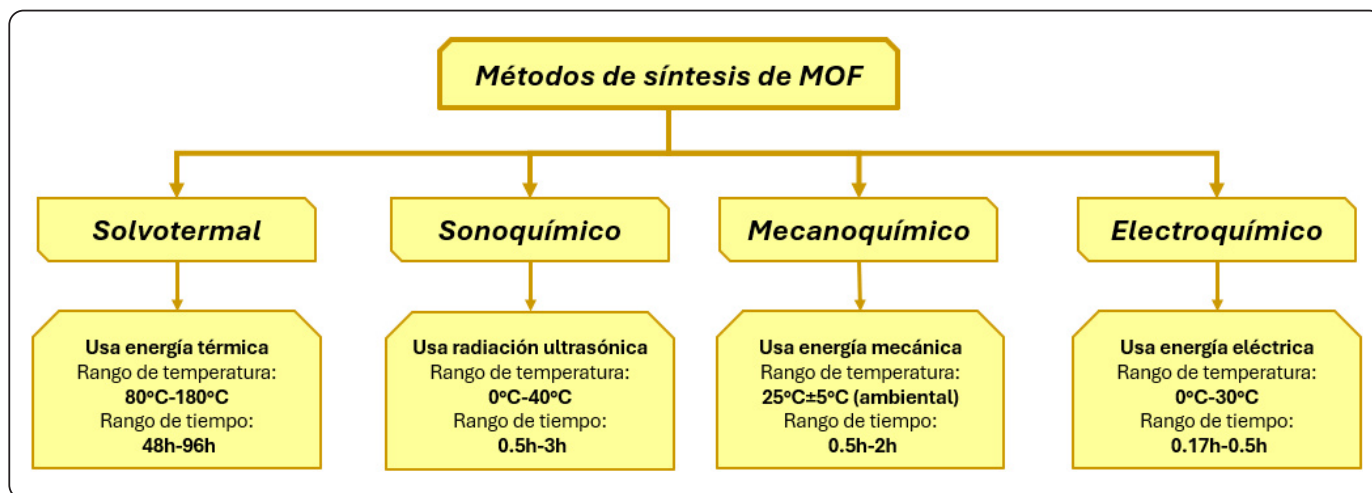


Figura 6. Principales métodos de síntesis de MOFs. [Elaborada por los autores]

los reactivos, la temperatura, el pH, el tiempo de reacción, el potencial redox y la reactividad (Gangu *et al.*, 2016). Un factor crítico para obtener un material con buenas propiedades es la elección de un disolvente idóneo. Adicionalmente, el tiempo de cristalización es crucial para que se lleve a cabo con éxito el proceso de nucleación y crecimiento de los cristales (Stock & Biswas, 2012).

El método **solvotermal** es el más eficaz y utilizado. Se realiza en un sistema cerrado que consta de un reactor o autoclave de teflón que contiene la sal metálica y el ligando orgánico disueltos en un disolvente orgánico en común que es calentado en un rango de temperatura, por lo general de 80-260°C, (Lee, Yoo, Ahmed, Lee & Jhung, 2013). Los iones metálicos se coordinan a través de los grupos funcionales de los ligandos orgánicos para crear la unidad porosa bidimensional o tridimensional. Una vez formado el material en el tiempo establecido se elimina el disolvente del medio a través de técnicas convencionales, entre ellas, la centrifugación y la filtración para posteriormente realizar el lavado. La síntesis solvotermal permite una regulación precisa del tamaño y la forma del material. Este proceso es ideal para producir las MOFs monocristalinas (Remya & Kurian 2019; Monama *et al.*, 2019).

Los métodos citados en líneas anteriores han sido investigados a través del tiempo con la finalidad de fabricar cristales de MOFs ultrafinas y uniformes en tiempos de reacción cortos (Stock & Biswas, 2012).

El método **sonoquímico** es una técnica que utiliza ondas ultrasónicas a través de un transductor para lograr una nucleación homogénea y acelerada. A través del método de cavitación, la energía ultrasónica cuya frecuencia oscila en el rango de 10-20 mHz, crea burbujas de gas en la solución que colapsan para formar una gran cantidad de sitios de calor localizado,

que generan centros de nucleación homogéneos (Lee, Kim & Ahn, 2013; Safaei, Foroughi, Ebrahimipoor, Jahani, Omid & Khatami, 2019). El resultado de las reacciones son partículas de MOF de tamaño pequeño en un tiempo de cristalización menor al del solvotermal tradicional (30-180 min) pero con ventajas similares a este en el control de la morfología y la pureza; sin embargo, se diferencia por el reducido tiempo de reacción (Lee *et al.*, 2013).

En el método **mecanoquímico**, los procesos fisicoquímicos son simultáneos; el de pulvimetalurgia consiste en utilizar la energía mecánica para inducir a una reacción química que forma la MOF y cuyo resultado es la producción de polvos compuestos controlados y finos. El primer paso de la síntesis mecanoquímica consiste en la desintegración mecánica de los enlaces intramoleculares, triturando los precursores con ayuda de un molino hasta obtener un menor tamaño de partícula y de mayor superficie, pero con la microestructura deseada. Posteriormente, la mezcla de precursores se somete a una activación mecánica para que se lleve a cabo la reacción química (Chen, Zhang, Jiao & Jiang, 2018; Glowinski, Szczesniak, Choma & Jaroniec, 2021). Este método ofrece una buena eficiencia energética y no se requiere de un disolvente ni calentamiento. En determinadas condiciones utilizan óxidos metálicos, precursores de la MOF, en lugar de la sal metálica y del subproducto se obtiene agua (Stock & Biswas, 2012; Zeng, Guo, He & Duan, 2016).

En la síntesis mecanoquímica se ha implementado de manera efectiva el uso de la molienda asistida por líquido. Se adiciona una pequeña cantidad de disolvente al medio, lo que acelera la reacción debido al movimiento de las moléculas, ya que actúa como un agente director de la estructura (Stock & Biswas, 2012; Chen, Wu, Liu, Sun, Xia & Li, 2018). Se demostró que mantener un menor tiempo de reacción permite aumentar el diámetro de

los poros resultantes en la MOF y la energía mecánica al influir en la morfología, provoca una reacción que merece el cuidado para su control y evitar la formación de impurezas. A pesar de las ventajas, el proceso mecanoquímico está restringido a la síntesis de ciertos tipos de MOF que no pueden producirse en grandes cantidades (Ahmed & Jung, 2014).

En el método **electroquímico** de MOFs descrito inicialmente por BASF (Badische Anilin-und Soda-Fabrik) en 2005 (Gangu *et al.*, 2016; Remya & Kurian, 2019), se utiliza la energía eléctrica que da paso a reacciones químicas. Este método se desarrolló para evitar los efectos indeseables de los aniones de las sales metálicas como los nitratos, los cloruros y los percloratos. El resultado, es un método que ofrece simplicidad, alta pureza de los materiales producidos y un mayor control sobre las condiciones de reacción. En una síntesis electroquímica directa, el procedimiento se basa en la disolución anódica, que permite la introducción continua de iones metálicos para interactuar con el ligando orgánico que se encuentra disuelto en el medio de reacción junto con un electrolito (Stock & Biswas, 2012; Gangu *et al.*, 2016; Remya & Kurian, 2019). Sin embargo, el electrodo de trabajo se corroe y libera iones metálicos que están o no presentes en la disolución anódica. Estos iones reaccionan con el ligando orgánico y generan la estructura cristalina de la MOF en forma de una película del material que se deposita en la superficie del electrodo de trabajo; de aquí provienen los iones metálicos y de las sales metálicas disueltas del propio metal del electrodo y en lo que se refiere a los ligandos orgánicos están disueltos en el medio de reacción. La deposición de los metales en el contraelectrodo se elimina con disolventes próticos y compuestos como el acrilonitrilo y los ésteres maleicos que se reducen para generar H₂ como subproducto durante el proceso (Lee *et al.*, 2013; Farha & Hupp, 2010). Las variables de operación y la estequiometría del método electroquímico permiten un control preciso sobre la formación de la MOF, lo que facilita el proceso continuo en comparación con la síntesis por lotes, (Stock & Biswas, 2012; Dey, Kundu, Biswal, Mallick & Banerjee, 2014), ofrecen altas velocidades de reacción y condiciones suaves, que son esenciales para producir las MOFs a gran escala (Remya & Kurian, 2019).

MOFs REPRESENTATIVOS

La variedad de unidades de construcción secundaria constituidas por diferentes nodos metálicos, su coordinación con la gran diversidad de ligandos orgánicos disponibles comercialmente y los obtenidos a partir de precursores sintetizados en laboratorio, propician la formación de una amplia gama de MOFs. Además, la posibilidad de una modificación química y la presencia de grupos funcionales en los ligandos orgánicos resulta en un número infinito de MOFs con arquitecturas supramoleculares y geometrías específicas. Esta versatilidad permite que cada clase de MOF exhiba propiedades físicas, químicas, térmicas y texturales únicas que proyectan su aplicación potencial hacia

áreas de catálisis, monitoreo, carga y liberación de fármacos, adsorción y separación en fase líquida y gaseosa, entre otras (Lee, Yoo, Ahmed, Lee & Jung, 2023; Yan *et al.*, 2022; Liu, Bigdeli, Panjehpour, Jung, Al Lawati & Morsali, 2023a; Rabiee, 2023; Sun *et al.*, 2025).

Las MOFs se clasifican según la composición química derivada de los iones metálicos y la naturaleza de los ligandos orgánicos, la topología y las dimensiones. Algunas clases de MOF más reconocidas y ampliamente reportadas en la literatura son las denominadas de acuerdo con sus acrónimos como ZIF (Zeolitic Imidazolate Frameworks), UiO (University of Oslo), MIL (Materials Institute Lavoisier), HKUST (Hong Kong University of Science and Technology) y CAU (Christian-Albrechts-Universität), (Shan *et al.*, 2024; Tanaka, Fuku, Ikenaga, Sharaf & Nakagawa, 2024). La Figura 7 muestra un esquema representativo de la estructura de algunas de las MOF descritas en esta sección.

ZIF (Zeolitic Imidazolate Frameworks)

Un ion del tipo imidazol constituye un ligando orgánico y es común que se coordine tetraédricamente con los iones de metales de transición divalentes Zn²⁺ y Co²⁺ para dar lugar a estructuras donde destacan ZIF-8 y ZIF-67. Derivado del ángulo de enlace metal-imadazolato-metal de 145°, esta familia presenta características topológicas comunes de las zeolitas que combinan con la estructura porosa cristalina propia de una MOF. En general, presentan considerable estabilidad térmica y resistencia al medio acuoso, en pH ácido y básico (Ighalo, Ragabhashiyam, Adeyanju, Ogunniyi, Adeniyi & Igwegbe, 2022).

En particular, ZIF-8 es una de las MOF más conocidas, está constituida por centros metálicos de Zn²⁺ coordinados fuertemente con el ligando 2-metil imidazol. Con atractivas propiedades texturales, con un área superficial de 1,600-1,800 m²/g y un tamaño de poro ajustable cercano a 12 Å (Cravillon, Münzer, Lohmeie, Feldhoff, Hubert & Wiebcke, 2009; Paul, Banga, Muthuukumar & Prasad, 2022). Por su alta estabilidad en el agua y a temperaturas de alrededor de 400°C es un buen candidato para ser usado en reacciones catalíticas, captura de carbono y adsorción selectiva de gases (Elaouni, El Ouardi, Zbair, BaQais, Saadi & Ahsaine, 2022). En lo que se refiere a la estructura análoga ZIF-67 es obtenida por el método solvotermal a partir de las fuentes de Co²⁺: Co(NO₃)₂, CoCl₂, CoSO₄ y los iones imidazolato como ligando orgánico. La porosidad y morfología son ajustables mediante variaciones en las condiciones de síntesis según el tipo y concentración de reactivos, el pH, el tiempo de reacción o el disolvente. Se distingue por las atractivas propiedades catalíticas otorgadas por los iones cobalto (Davoodi, Davar, Rezayat, Jafari & Shalan, 2021; Duan, Yu & Hu, 2022). Otros miembros son: ZIF-7, ZIF-11 y ZIF-90 obtenidos por la variación en el ligando orgánico con benzimidazol, 2-nitroimidazol y 2-carboxialdehído

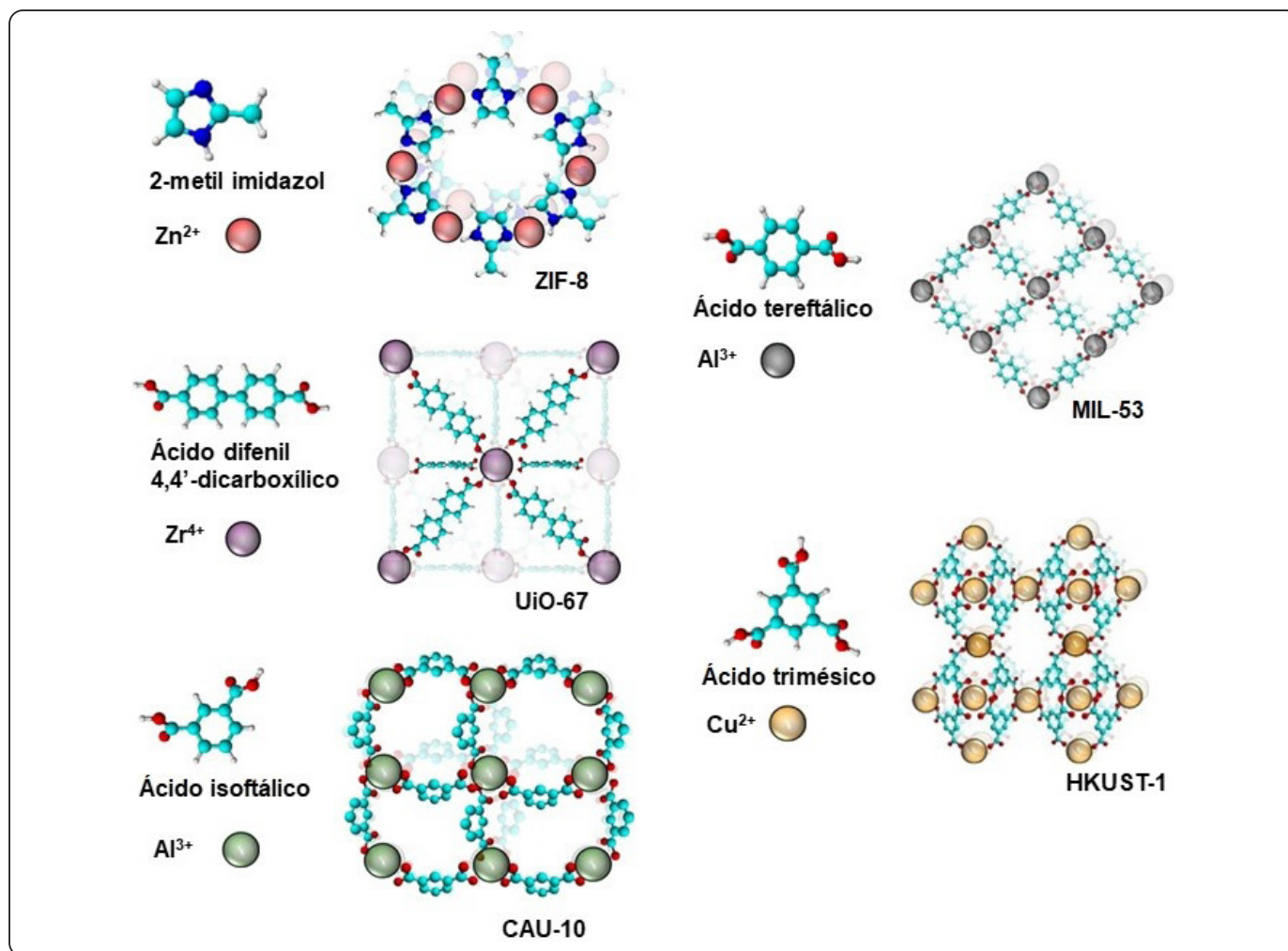


Figura 7. Representación esquemática de algunas MOF. [Elaborada por los autores]

imidazol, respectivamente, lo que repercute significativamente en la topología y las propiedades finales (Tanaka *et al.*, 2024; Ighalo *et al.*, 2022).

UiO (University of Oslo)

Las series de estructuras de tipo UiO son obtenidas en general por vía solvotermal y el uso del disolvente N,N-dimetilformamida. La mayoría, tienen nodos metálicos de zirconio (a partir de $ZrCl_4$) que se coordinan con diferentes especies dicarboxiladas aromáticas, desde la más simple, el ácido tereftálico, que da lugar a la estructura denominada UiO-66 de geometría octaédrica y tamaño nanométrico (~60 nm), hasta los ligantes aromáticos policíclicos voluminosos difenilcarboxilato y naftilcarboxilato (Ru, Wang, Wang, Cui, Du & Lu, 2021). Esta variación en el ligante orgánico permite la modulación del tamaño del poro, genera las estructuras UiO-67 y UiO-68, respectivamente, que se caracterizan por alcanzar un mayor tamaño de poro de 12-17 Å y un área superficial de 2,000 m²/g. Esta modulación del tamaño del

poro y estructura más fuerte ha promovido su aplicación en la adsorción y la catálisis, gracias a su capacidad para contener moléculas orgánicas de gran tamaño (Tan, Zou, Sun, Long, Li & Yu, 2024; Hu, Wang, Lan, Xiao & Tang, 2024). Derivado del fuerte enlace de coordinación Zr-O, tiene una elevada estabilidad térmica superior a los 350°C y una estabilidad química capaz de tolerar diversos disolventes y agua (Zou & Liu, 2019).

Los derivados funcionales de las estructuras UiO son obtenidos por la inclusión de ligantes orgánicos portadores de los grupos sustituyentes amino (UiO-66-NH₂), nitro (UiO-66-NO₂) o sulfónico (UiO-66-SO₃H), (Adegoke *et al.*, 2024; Zhuang, Cheng & Wang, 2019; Zhang, Long, Wang, Liu & Ma, 2024). Los grupos funcionales incrementan la parte reactiva e hidrofílica de la estructura, actúan como sitios activos y son afines hacia ciertas moléculas a través de la formación de interacciones electrostáticas, para utilizarse en áreas de adsorción de moléculas orgánicas y catálisis.

MIL (Material Institute Lavoisier)

En esta clase de MOF los centros metálicos trivalentes Al^{3+} , Cr^{3+} , Ti^{3+} y Fe^{3+} forman un enlace coordinado con los ligandos orgánicos dicarboxílicos (ácido tereftálico) o multicarboxílicos (ácido trimésico). Su estructura se considera altamente estable hasta los 300°C , bajo condiciones de humedad y pH bajo (Keshta, Yu & Wang, 2023). Al igual que otras MOFs, la geometría y las dimensiones del poro de las estructuras MIL son modulables según la naturaleza del ligando orgánico y del nodo metálico, por lo que sus propiedades estructurales y texturales varían notablemente según los precursores. Tienen un área superficial muy amplia de $1,000\text{-}5,000\text{ m}^2/\text{g}$ y un tamaño de poro altamente variable (Yang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022).

Las estructuras MIL-53 basadas en iones aluminio, cromo o hierro y el ácido tereftálico, constituyen los sistemas más conocidos de ellas. Constan de una estructura cristalina tridimensional con un arreglo de poros unidimensional. Las condiciones experimentales de temperatura y disolventes tienen un efecto significativo en las propiedades texturales (Meshram & Sontakke, 2021). Además, esta serie de MOFs presenta un fenómeno peculiar que en inglés se le llama “breathing behavior” por los cambios dinámicos de expansión y contracción de los poros, por efecto de la presión, la temperatura, la presencia de agua, los disolventes, los gases u otras moléculas huéspedes (Tomar & Singh, 2021; Bitzer, Heck & Kleist, 2020).

HKUST (Hong Kong University of Science and Technology)

Esta clase presenta estructuras tridimensionales compuestas por iones de cobre (a partir de los precursores $\text{Cu}(\text{NO})_3$ y CuCl_2) coordinados con los átomos de oxígeno de ligandos orgánicos (el ácido trimésico) que da lugar a la HKUST-1. Este material ha sido estudiado y sintetizado por vía solvotermal, con variación del medio de reacción y la metodología de síntesis a fin de modular el tamaño de partícula en el orden nanométrico, con estabilidad térmica y tolerancia al medio acuoso mejoradas (Cai *et al.*, 2019; Zhao, Nie, Luo, Xiao, Zou & Chen, 2024b). Por su área superficial ($1,500\text{-}2,000\text{ m}^2/\text{g}$) y el tamaño del poro de 16 Å es candidata para procesos de adsorción y carga de moléculas orgánicas de gran tamaño, en este caso, los fármacos, los colorantes y los pesticidas (Panda *et al.*, 2020). Es también por los iones Cu^{2+} que sus propiedades antibacterianas son útiles para aplicaciones biomédicas (Cun *et al.*, 2022).

CAU (Christian-Albrechts University of Kiel)

Varias MOFs de tipo CAU se sintetizaron a partir de fuentes con los iones Al^{3+} de centro metálico y los ácidos di o tri carboxílicos aromáticos y sus derivados funcionalizados de ligando orgánico. Se caracterizan por su estabilidad en condiciones de alta temperatura ($\sim 300^{\circ}\text{C}$) y humedad, incluso en medio ácido (Wu, Prasetya & Li, 2020). Las más significativas son CAU-1 y CAU-10. El tipo CAU-1 se obtiene de los precursores $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y el ácido 2-amino isoftálico en

metanol por vía solvotérmica. Con un área superficial de $1,100\text{-}1,700\text{ m}^2/\text{g}$, un poro menor a 10 Å , y los grupos funcionales OH y NH_2 que favorecen las interacciones electrostáticas y de puente de hidrógeno con potencial para la adsorción de las moléculas orgánicas (Li *et al.*, 2024). Al tipo CAU-10 la integran miembros que al variar las fuentes entre $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ con ácido isoftálico y sus derivados, dan lugar a una amplia gama de materiales con características topológicas, morfológicas y texturales particulares (Wu *et al.*, 2020; Sran *et al.*, 2023).

APLICACIONES DE LAS MOFs

Las propiedades texturales, de estabilidad térmica, química y acuosa al igual que la presencia de grupos funcionales y sitios reactivos facilitan la viabilidad de las MOFs en aplicaciones que involucran procesos de adsorción, remoción y filtración; por lo que son parte crucial de la investigación y desarrollo de tecnologías novedosas para la separación y almacenamiento de gases, la adsorción y remoción de metales, y de moléculas orgánicas catalogadas como contaminantes del agua, una solución a los problemas relacionados con el cambio climático y la sostenibilidad ambiental (Tanaka *et al.*, 2024; Liu, Shan, Zhang, Kong & Pang, 2023b).

Las formas en que se aplican estas estructuras cristalinas híbridas son principalmente como partículas sólidas adsorbentes (Kobielska, Howarth, Farha & Nayak, 2018), en membranas basadas puramente en MOFs y membranas de matriz mixta (MMM), (Wintara *et al.*, 2020). Las membranas puramente basadas en MOFs son obtenidas por rutas de preparación *in situ* sobre un sustrato (p. ej. crecimiento *in situ*, crecimiento a partir de semilla, y epitaxia en fase líquida, etc.) con morfología uniforme, espesor homogéneo y ultradelgado. Por otra parte, las membranas de matriz mixta son el resultado de la combinación y mezclado físico de partículas de MOFs en una fase continua polimérica. Estas últimas ofrecen las ventajas propias de las MOFs en conjunto con el procesamiento, versatilidad y variedad de las matrices poliméricas aptas para el desarrollo de membranas en configuración plana o en fibra hueca.

Aplicaciones de MOFs en separación y adsorción de gases

La necesidad de separar y purificar gases de interés industrial ha propiciado el desarrollo de tecnologías más eficientes y selectivas. El aporte de las diferentes MOFs es sustancialmente en el desarrollo de investigaciones para la captura y separación de los gases de H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 , CH_4 (Liu *et al.*, 2023a). Debido a la uniformidad y tamaño del poro modulable en el rango microporoso, las MOFs separan los gases por un efecto de tamizaje molecular al discriminar según el diámetro cinético de las moléculas. Además, la amplia área superficial y el volumen del poro son factores que determinan que una mayor cantidad de gas sea adsorbida con eficacia. Aunado a esto, las interacciones químicas impulsadas por los ligandos orgánicos como los puentes de hidrógeno, las interacciones $\pi\text{-}\pi$, las Van der Waals

y las interacciones directas con el nodo metálico incrementan su afinidad preferencial hacia ciertos gases.

La estructura porosa y altamente estable de ZIF-8 es de especial utilidad para separar CO₂ del CH₄, debido a las interacciones electrostáticas con el CO₂ y el tamaño del poro que facilita su paso (Shahid & Nijmeijer, 2017). Con la adición de 10-30% en peso de ZIF-8 en una mezcla de poliimida/polisulfona obtuvieron MMM con permeabilidad de CO₂ y CH₄ mejorada y alta selectividad. Los investigadores sugieren que con el mayor contenido de ZIF-8 se logra un aumento en la difusión de los gases, lo que es promovido por la porosidad del material.

La alta estabilidad química y los grupos funcionales presentes en la estructura de UiO-66 favorecen su uso potencial en el transporte selectivo de gases (Liu, Nothling, Webley, Jin, Fu & Qiao, 2020). En lo publicado se menciona que la UiO-66-NH₂ aporta un efecto benéfico en la permeabilidad, la selectividad y la resistencia al envejecimiento físico de las membranas de matriz de poliimida (Wang *et al.*, 2021). La MOF actúa como el relleno portador de un grupo funcional con afinidad hacia el CO₂, favorece la solubilidad selectiva en el sistema, la permeabilidad y al fungir como sitio para la formación de enlaces covalentes con la matriz polimérica se mejora la interacción y la compatibilidad entre las fases.

Otros estudios muestran la contribución del grupo sulfónico (-SO₃H) en UiO-66 hacia las propiedades de permeación de un sistema de membranas basadas en polisulfona (Thair *et al.*, 2019). Al adicionar un 30% en peso de SO₃H-UiO-66 es mayor la fracción de volumen libre y aumenta la selectividad del CO₂/CH₄ y la del CO₂/N₂, en comparación con el sistema que contiene la MOF sin grupos funcionales, destacando el papel del grupo funcional para la obtención de sistemas de membranas más eficientes y selectivas.

Estructuras del tipo UiO-67 altamente estables al agua y obtenidas a partir de los ácidos bifenil y binaftil carboxílicos fueron utilizadas para la adsorción del metano (Øien-Ødegaard *et al.*, 2016). También, gracias a la presencia de los grandes grupos aromáticos, las MOFs muestran una aceptable capacidad de adsorción del metano aun con una porosidad reducida.

Aplicaciones de MOFs en la remoción de metales pesados

Un reto de salud pública es la eliminación de los iones metálicos contenidos en el suministro de agua que ingresan al sistema por fuentes naturales o antropogénicas, el desgaste u oxidación de las tuberías, o desechos de la minería y otros sectores industriales.

Los métodos para la eliminación de metales pesados en el agua incluyen precipitación química, intercambio iónico, tratamientos electroquímicos y fotocatalíticos, tecnologías de filtración de membrana y adsorción, este último es un proceso preferido por su simplicidad y su desempeño. En la actualidad, los adsorbentes

más utilizados e investigados son: nanoestructuras de carbono, arcillas, zeolitas, óxidos metálicos y materiales porosos que muestran afinidad por los metales pesados (Adam *et al.*, 2022). Debido a su capacidad de ajuste y alta área superficial, las MOFs son adsorbentes, altamente porosas que han ganado popularidad en los últimos años, ya sea en sus formas originales o post-funcionalizadas con los grupos aminas, sulfatos, hidroxilos y las cadenas alquílicas.

Las MOFs ofrecen ventajosas oportunidades de uso para el tratamiento de aguas contaminadas con los metales pesados: arsénico, mercurio, cromo, plomo, cobre, entre otros también nocivos para el medio ambiente y la salud humana (Kobielska *et al.*, 2018). Novedosas investigaciones muestran que al integrar las MOFs a diversos métodos de tratamiento de agua, la estructura porosa modulable y superficie portadora de los grupos funcionales favorecen la adsorción y sitios de afinidad para la transmetalación o quelación con los iones metálicos, y mejorar la eficiencia del tratamiento (Bhuyan & Ahmaruzzaman, 2022). La adecuada estabilidad química de las MOFs en medio acuoso, básico o ácido, juega un rol importante para lograr las condiciones de adsorción y remoción óptimas (pH, temperatura, concentración y tiempo de contacto) requeridas para su aplicación en la remediación del agua (Kobielska *et al.*, 2018).

En recientes estudios de adsorción de Pb²⁺ y Cu²⁺ usan partículas de UiO-66-NH₂ modificada con cianamida en condiciones de pH de 1-6 (Zhao *et al.*, 2024a). Bajo condiciones ácidas de pH < 3, la existencia de H⁺ en el medio compite con los cationes metálicos, por lo que las mejores condiciones de adsorción se dan cuando las atracciones electrostáticas ion-partícula se favorecen al aumentar el pH. Además, se observa una rápida y preferente adsorción de Pb²⁺ en sistemas simples, en sistemas de iones mezclados con Pb²⁺-Cu²⁺ e incluso en presencia de compuestos orgánicos y otros iones metálicos monovalentes y divalentes. Otro estudio basado en UiO-66 con funcionalidades NH₂ y OH evidencia los alcances logrados en la remoción de Ni²⁺, Fe³⁺ y Cr⁶⁺ y el efecto de los grupos funcionales sobre la capacidad de adsorción selectiva (Zhai *et al.*, 2023). Los investigadores observaron que una mayor área superficial incrementa la capacidad de adsorción del Ni²⁺ y el Fe³⁺ en las MOFs sin grupos funcionales. No obstante, en el caso particular del Cr⁶⁺, los grupos OH contribuyen sustancialmente a lograr una mayor adsorción, en especial en pH ácido, indicativo de que el mecanismo dominante en la adsorción se basa en las atracciones electrostáticas entre las especies formadas en solución de Cr⁶⁺ negativamente cargadas y los grupos OH protonados de la MOF.

La notable estabilidad térmica de ZIF-8, así como su resistencia química en diversos disolventes, incluida el agua, son aprovechadas para el desarrollo de membranas compuestas de matriz polimérica para la remoción por filtración de cobalto, níquel, plomo y las sales de NaCl y de MgSO₄ (Gozali-Balkanloo,

Marjani & Mahoudian, 2024). Los estudios realizados con las membranas y un 5% en peso de ZIF-8 de diferente tamaño de partícula indican que a menor tamaño mejor desempeño en la remoción de sales y de metales pesados, con la tendencia $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Ni^{2+} > Cr^{2+}$, atribuida al radio iónico de las especies metálicas y una mayor cantidad de sitios activos en relación área-volumen en las membranas.

La aplicación dual en adsorción de Cr^{6+} y su degradación fotocatalítica con ZIF-8 dopada con Ag y sintetizada *in situ* en membranas de polifluoruro de vinilideno fue reportada por (Chen *et al.*, 2025). Los experimentos demostraron eficacia en la remoción y reducción del Cr^{3+} de las partículas Ag/ZIF-8 y un aumento en la capacidad de adsorción-fotocatálisis al incorporarlas en las membranas. Los estudios en medio ácido fueron un éxito al favorecer la reducción y la interacción con especies de carga negativa.

Aplicación de las MOFs en la remoción de colorantes

Los colorantes son un tipo de contaminante de origen químico orgánico presente en las aguas residuales por actividades antropogénicas. Existen más de noventa mil tipos de colorantes utilizados en la industria responsable de su acumulación en el ecosistema y que por su extenso tiempo de vida media persisten en el medio acuoso (contaminantes persistentes), (Moradihamedani, 2022).

Por sus características químicas, a los colorantes se les clasifica en iónicos y no iónicos, diferenciados por la presencia/ausencia de polarización en su estructura. Las MOFs por sus características ya descritas se les considera idóneos para la remoción de colorantes a través de los procesos de filtración y adsorción. El proceso de filtración se basa en la restricción selectiva por el tamaño de los poros y la adsorción por la naturaleza del contaminante objetivo y la química de la MOF utilizada. Para la adsorción de compuestos orgánicos como los colorantes, los mecanismos incluyen la formación de enlaces químicos, interacciones electrostáticas e interacciones ácido-base (Dhaka, Kumar, Deep, Kurade, Ji & Jeon, 2019).

Las interacciones electrostáticas ocurren cuando las MOFs modificadas/funcionales con carga superficial interactúan con los contaminantes de carga opuesta como los colorantes iónicos. Adicional, la carga superficial de las MOF varía con el pH del sistema acuoso y con los grupos funcionales presentes en la superficie, que pueden o no protonarse. Otros mecanismos de adsorción que también son aplicables en la remoción de contaminantes orgánicos son las fuerzas de Van der Waals y el atrapamiento en los poros (Wen, Fang & Zeng, 2018). Diversas investigaciones han evaluado las MOFs en óxidos metálicos utilizados para la adsorción de colorantes orgánicos (Huang & Lee, 2015). Algunos de los colorantes más comunes removidos del agua son el azul de metileno, el verde de malaquita, el amarillo de alizarina y el rojo Congo,

entre otros (Bayram, Moral, Köksal, Göde & Pehlivan, 2023; Swan & Zaini, 2019). Una MOF de tipo MIL-125 con grupos $-NH_2$ y sintetizada mediante el método hidrotermal para la adsorción de colorantes catiónicos, tiene una alta capacidad de adsorción al azul de metileno (300-400 mg/g), impulsada por las interacciones electrostáticas entre los grupos amino colorante-MOF (Bibi *et al.*, 2017).

Las MOFs son adaptables a una aplicación en particular por una alteración en su estructura para formar compuestos (Liu, Liu, Huang, Cheng, Zeng & Lai, 2019; Deria, Mondloch, Karagiari, Bury, Hupp & Farha, 2014; Yin *et al.*, 2019). La formación de compuestos de la MOF con otros materiales es para aumentar la selectividad y mejorar la eficiencia de adsorción en la remoción de un componente en específico, un colorante, o bien para resistir distintas condiciones del medio de remoción y ampliar sus rangos de efectividad.

Las novedosas propiedades magnéticas de los nanomateriales son un éxito para formular MOFs híbridas a fin de eliminar contaminantes persistentes (metales pesados y colorantes orgánicos), (Zhao *et al.*, 2019; Abdi, Mahmoodi, Vossoughi & Alemzadeh, 2019). Una MOF nanocompuesta de partículas de $MnFe_3O_4$, recubiertas de sílice-ZIF-8, con una amplia área superficial superior a 800 m^2/g y con propiedades súper paramagnéticas mostró una eliminación selectiva de colorantes orgánicos en los sistemas multicomponentes. Un aspecto relevante de los materiales es la conservación de su capacidad de adsorción original por encima del 90%, y una eficiente separación magnética después de varios ciclos sucesivos de adsorción-desorción, lo que demuestra su posibilidad de reciclaje (Abdi *et al.*, 2019).

Con el uso del nanocompuesto magnético $Fe_3O_4/MIL-101(Cr)$, se observa su capacidad para la eliminación de los colorantes orgánicos rojo ácido 1 y naranja G (Wang, Zhao, Lu, Chen, Zhang & Hou, 2016). Los resultados en las MOFs de núcleo-coraza con propiedades magnéticas es que son buenas candidatas para eliminar colorantes de las aguas residuales. Otros compuestos magnéticos basados en ZIF-67 y Fe_3O_4 adsorben el naranja de metilo en una mezcla con azul de metileno. Este compuesto magnético demostró una alta capacidad de adsorción del naranja de metilo con una tasa de separación superior al 90% (Yang *et al.*, 2017).

Los polímeros se combinan con las MOFs acorde con su compatibilidad química y morfológica, ya que en la mayoría de los compuestos polímero-MOF se busca mejorar las propiedades selectivas de adsorción y filtración y las propiedades mecánicas para ampliar el rango de aplicación. Esta tecnología de separación basada en membranas híbridas se aplica con frecuencia en la purificación del agua y en las industrias: petroquímica, médica, energética y alimentaria, entre otras (Fard *et al.*, 2018). Es así que se han sintetizado con éxito las

membranas híbridas de polietileno con una gran carga de NH_2 -UiO para separaciones de alto flujo. La presencia de la MOF en la membrana favorece la permeación del agua, altos valores de rechazo cercanos al 99% de los colorantes orgánicos rojo Congo, naranja G y violeta ácida por efecto de las interacciones electrostáticas con una carga de MOF presente en la superficie de la membrana (Wang *et al.*, 2019). Estas membranas polímero-MOF se caracterizan por sus propiedades antiincrustantes y una estabilidad a largo plazo.

CONCLUSIONES

Las MOFs presentan un rol sobresaliente como materiales porosos muy efectivas para la remediación de aguas contaminadas y procesos de purificación de gases. La versatilidad de síntesis, propiedades estructurales únicas y modulables las posiciona con ventaja en el campo de la adsorción y separación selectiva de compuestos orgánicos e inorgánicos. Es notable la variabilidad porosa y la morfología, controlada por elección del método de síntesis, los precursores y las condiciones de reacción, con la oportunidad de diseñar las MOFs de acuerdo con las necesidades. Diversas MOFs son representativas por efectivas en el tratamiento de los gases industriales CO_2 , CH_4 , N_2 y O_2 , cuya estructura porosa y los grupos funcionales influyen en el mecanismo de captura y separación selectiva. Así también, la estabilidad de las MOFs, en el medio acuoso, al combinarse con las interacciones de grupos funcionales específicos, son vitales para mantener su funcionamiento y alto desempeño en la remoción de colorantes y metales pesados. Por lo tanto, es posible un futuro promisorio en el desarrollo de las MOFs en la obtención de materiales altamente estables y selectivos, de forma reproducible y escalable, con la visión de aplicarlas en la industria y en el medioambiente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca para estudios de Maestría. Al CIQA por el financiamiento otorgado con el proyecto #6795. Al programa Investigadoras e Investigadores por México de la SECIHTI.

REFERENCIAS

- Abdi, J., Mahmoodi, N. M., Vossoughi, M. & Alemzadeh, I. (2019). Synthesis of magnetic metal-organic framework nanocomposite (ZIF-8@ SiO_2 @ MnFe_2O_4) as a novel adsorbent for selective dye removal from multicomponent systems. *Micropor. Mesopor. Mater.*, **273**, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.06.040>
- Adam, M. R., Othman, M. H. D., Kurniawan, T. A., Puteh, M. H., Ismail, A. F., Khongnakorn, W., Rahman, M. A. & Jaafar, J. (2022). Advances in adsorptive membrane technology for water treatment and resource recovery applications: A critical review. *J. Environ. Chem. Eng.*, **10**, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107633>
- Adegoke, K. A., Akpomie, K. G., Okeke, E. S., Olisah, C., Malloum, A., Maxakato, N. W., Ighalo, J. O., Conradie, J., Ohoro, C. R., Amaku, J. F. & Oyedotun, K. O. (2024). UiO-66-based metal-organic frameworks for CO_2 catalytic conversion, adsorption and separation. *Separ. Purif. Technol.*, **331**, 125456. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125456>
- Ahmed, I. & Jhung, S. H. (2014). Composites of metal-organic frameworks: Preparation and application in adsorption. *Mater. Today*, **17**, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.03.002>
- Andriamitantsoa, R. S., Wang, J., Dong, W., Gao, H. & Wang, G. (2016). SO_3H -functionalized metal organic frameworks: An efficient heterogeneous catalyst for the synthesis of quinoxaline and derivatives. *RSC Adv.*, **6**, 35135-35143. <https://doi.org/10.1039/C6RA02575G>
- Bao, S., Li, K., Ning, P., Peng, J., Jin, X. & Tang, L. (2018). Synthesis of amino-functionalization magnetic multi-metal organic framework ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MIL}-101(\text{Al}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})/\text{NH}_2$) for efficient removal of methyl orange from aqueous solution. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **87**, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.03.009>
- Bayram, O., Moral, E., Köksal, E., Göde, F. & Pehlivan, E. (2023). Removal of methyl blue and malachite green from water using biodegradable magnetic *Tamarindus indica* fruit seed biochar: Characterization, equilibrium study, modelling and thermodynamics. *Sustain. Chem. Environ.*, **3**, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100023>
- Bhuyan, A. & Ahmaruzzaman, M. (2022). Metal-organic frameworks: A new generation potential material for aqueous environmental remediation. *Inorg. Chem. Commun.*, **140**, 109436. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109436>
- Bibi, R., Wei, L., Shen, Q., Tian, W., Kehinde, O., Li, N. & Zhou, J. (2017). Effect of amino functionality on the uptake of cationic dye by titanium-based metal organic frameworks. *J. Chem. Eng. Data*, **62**, 1615-1622. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b01012>
- Bitzer, J., Heck, S. L. & Kleist, W. (2020). Tailoring the breathing behavior of functionalized MIL-53(Al , M)- NH_2 materials by using the mixed-metal concept. *Micropor. Mesopor. Mater.*, **308**, 110329. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110329>
- Cai, X., Xiw, Z., Pang, M. & Lin, J. (2019). Controllable synthesis of highly uniform nanosized HKUST-1 crystals by liquid-solid-solution method. *Cryst. Growth Des.*, **19**, 556-561. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b01695>
- Canivet, J., Fateeva, A., Guo, Y., Coasne, B. & Farrusseng, D. (2014). Water adsorption in MOFs: Fundamentals and applications. *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 5594-5617. <https://doi.org/10.1039/c4cs00078a>
- Chen, C., Yue, J., Zhou, J., Liu, Q., Tang, Y., Chen, C. & Xiao G. (2025). Removal of Cr (VI) by coupled adsorption and photocatalytic degradation based on Ag/ZIF-8/PVDF membrane. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, **208**, 110120. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110120>

- Chen, Y., Wu, H., Liu, Z., Sun, X., Xia, Q. & Li, Z. (2018). Liquid-assisted mechanochemical synthesis of copper based MOF505 for the separation of CO₂ over CH₄ or N₂. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**, 703-709. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03712>
- Chen, Y. Z., Zhang, R., Jiao, L. & Jiang, H. L. (2018). Metal-organic framework-derived porous materials for catalysis. *Coord. Chem. Rev.*, **362**, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.02.008>
- Cravillon, J., Münzer, S., Lohmeier, S. J., Feldhoff, A., Hubert, K. & Wiebcke, M. (2009). Rapid room-temperature synthesis and characterization of nanocrystals of a prototypical zeolitic imidazolate framework. *Chem. Mater.*, **21**, 1410-1412. <https://doi.org/10.1021/cm900166h>
- Cui, Y., Li, B., He, H., Zhou, W., Chen, B. & Qian, G. (2016). Metal-organic frameworks as platforms for functional materials. *Acc. Chem. Res.*, **49**, 483-493. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00530>
- Cun, J. E., Fan, X., Pan, Q., Gao, W., Luo, K., He, B. & Pu, Y. (2022). Copper-based metal-organic frameworks for biomedical applications. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **305**, 102686. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102686>
- Davoodi, M., Davar, F., Rezayat, M. R., Jafari, M. T. & Shalan, A. E. (2021). Cobalt metal-organic framework-based ZIF-67 for the trace determination of herbicide molinate by ion mobility spectrometry: investigation of different morphologies. *RSC Adv.*, **11**, 2643. <https://doi.org/10.1039/D0RA09298C>
- Deria, P., Mondloch, J. E., Karagiari, O., Bury, W., Hupp, J. T. & Farha, O. K. (2014). Beyond post-synthesis modification: Evolution of metal-organic frameworks via building block replacement. *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 5896-5912. <https://doi.org/10.1039/C4CS00067F>
- Dey, C., Kundu, T., Biswal, B. P., Mallick, A. & Banerjee, R. (2014). Crystalline metal-organic frameworks (MOFs): Synthesis, structure and function. *Acta Cryst. B*, **70**, 3-10. <https://doi.org/10.1107/S2052520613029557>
- Dhaka, S., Kumar, R., Deep, A., Kurade, M. B., Ji, S. W. & Jeon, B. H. (2019). Metal-organic frameworks (MOFs) for the removal of emerging contaminants from aquatic environments. *Coord. Chem. Rev.*, **380**, 330-352. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.10.003>
- Ding, M., Cai, X. & Jiang, H. L. (2019). Improving MOF stability: Approaches and applications. *Chem. Sci.*, **10**, 10209-10230. <https://doi.org/10.1039/C9SC03916C>
- Duan, C., Yu, Y. & Hu, H. (2022). Recent progress on synthesis of ZIF-67 based materials and their application to heterogeneous catalysis. *Green Energy Environ.*, **7**, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.12.023>
- Elaoui, A., El Ouardi, M., Zbair, M., BaQais, A., Saadi, M. & Ahsaine, H. A. (2022). ZIF-8 metal organic framework materials as a superb platform for the removal and photocatalytic degradation of organic pollutants: a review. *RSC Adv.*, **12**, 31801. <https://doi.org/10.1039/D2RA05717D>
- Elsaidi, S. K., Mohamed, M. H., Banerjee, D. & Thallapally, P. K. (2018). Flexibility in metal-organic frameworks: A fundamental understanding. *Coord. Chem. Rev.*, **358**, 125-152. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.11.022>
- Fard, A. K., McKay, G., Buekenhoudt, A., Sulaiti, H. A., Motmans, F., Khraisheh, M. & Atieh, M. (2018). Inorganic membranes: Preparation and application for water treatment and desalination. *Materials*, **11**, 74. <https://doi.org/10.3390/ma11010074>
- Farha, O. K. & Hupp, J. T. (2010). Rational design, synthesis, purification, and activation of metal-organic framework materials. *Acc. Chem. Res.*, **43**, 1166-1175. <https://doi.org/10.1021/ar1000617>
- Gangu, K. K., Maddila, S., Mukkamala, S. B. & Jonnalagadda, S. B. (2016). A review on contemporary metal-organic framework materials. *Inorg. Chim. Acta*, **446**, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2016.02.062>
- Glowinski, S., Szczesniak, B., Choma, J. & Jaroniec, M. (2021). Mechanochemistry: Toward green synthesis of metal-organic frameworks. *Mater. Today*, **46**, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.01.008>
- Gozali-Balkanloo, P., Marjani, A. P. & Mahoudian, M. (2024). Fabrication, characterization, and performance evaluation of polysulfone nanocomposite membranes containing different sizes of ZIF-8 to desalination and heavy metals removal from wastewater. *Chem. Eng. J.*, **496**, 153835. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153835>
- Hu, C., Wang, X., Lan, Y., Xiao, L. & Tang, S. (2024). UiO-type MOFs catalyzed ring-opening copolymerization of epoxides and cyclic anhydrides. *European Polym. J.*, **203**, 112695. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112695>
- Huang, Z. & Lee, H. K. (2015). Micro-solid-phase extraction of organochlorine pesticides using porous metal-organic framework MIL-101 as sorbent. *J. Chromatogr. A*, **1401**, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.04.052>
- Ighalo, J. O., Ragabhashiyam, S., Adeyanju, C. A., Ogunniyi, S., Adeniyi, A. G. & Igwegbe, C. A. (2022). Zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs) for aqueous phase adsorption-A review. *J. Ind. Eng. Chem.*, **105**, 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.09.029>
- Keshta, B. E., Yu, H. & Wang, L. (2023). MIL series-based MOFs as effective adsorbents for removing hazardous organic pollutants from water. *Separ. Purif. Technol.*, **322**, 124301. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124301>
- Kobielska, P. A., Howarth, A. J., Farha, O. K. & Nayak, S. (2018). Metal-organic frameworks for heavy metal removal from water. *Coord. Chem. Rev.*, **358**, 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.12.010>
- Lalawmpuia, R., Lalhruaitluangi, M., Lalhmunsiam & Tiwari, D. (2024). Metal organic framework (MOF): Synthesis and fabrication for the application of electrochemical sensing. *Environ. Eng. Res.*, **29**, 230636. <https://doi.org/10.4491/eer.2023.636>
- Lawson, H. D., Walton, S. P. & Chan, Ch. (2021). Metal-organic

- frameworks for drug delivery: A design perspective. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 7004–7020. <https://dx.doi.org/10.1021/acsami.1c01089>
- Lee, G., Yoo, D. K., Ahmed, I., Lee, H. J. & Jhung, S. H. (2023). Metal-organic frameworks composed of nitro groups: Preparation and applications in adsorption and catalysis. *Chem. Eng. J.*, **451**, 138538. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138538>
- Lee, Y. R., Kim, J. & Ahn, W. S. (2013). Synthesis of metal-organic frameworks: A mini review. *Korean J. Chem. Eng.*, **30**, 402–751. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0140-6>
- Li, Z., Liu, M., Fang, C., Zhang, H., Liu, T., Liu, Y., Tian, H., Han, J. & Zhang, Z. (2024). Aluminium-based MOF CAU-1 facilitates effective removal of florfenicol via hydrogen bonding. *J. Saudi Chem. Soc.*, **28**, 101879. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2024.101879>
- Li, N., Xu, J., Feng, R., Hu, T. & Bu, X. (2016). Governing metal-organic frameworks towards high stability. *Chem. Commun.*, **52**, 8501–8513. <https://doi.org/10.1039/C6CC02931K>
- Liu, K. G., Bigdeli, F., Panjehpour, A., Jhung, S. H., Al Lawati, H. A. J. & Morsali, A. (2023a). Potential applications of MOF composites as selective membranes for separation of gases. *Coord. Chem. Rev.*, **496**, 215413. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215413>
- Liu, M., Nothling, M. D., Webley, P. A., Jin, J., Fu, Q. & Qiao, G. G. (2020). High-throughput CO₂ capture using PIM-1@MOF based thin film composite membranes. *Chem. Eng. J.*, **396**, 125328. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125328>
- Liu, X., Shan, Y., Zhang, S., Kong, Q. & Pang, H. (2023b). Application of metal organic framework in wastewater treatment. *Green Energy Environ.*, **8**, 698–721. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.03.005>
- Liu, Y., Liu, Z., Huang, D., Cheng, M., Zeng, G. & Lai, C. (2019). Metal or metal-containing nanoparticle@MOF nanocomposites as a promising type of photocatalyst. *Coord. Chem. Rev.*, **388**, 63–78. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.02.031>
- Lu, W., Wei, Z., Gu, Z. Y., Liu, T. F., Park, J., Park, J., Tian, J., Zhang, M., Zhang, Q., Gentle III, T., Bosch, M. & Zhou, H. C. (2014). Tuning the structure and function of metal–organic frameworks via linker design. *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 5561–5593. <https://doi.org/10.1039/C4CS00003J>
- McKinstry, C., Cussen, E. J., Fletcher, A. J., Patwardhan, S. V. & Sefcik, J. (2013). Effect of synthesis conditions on formation pathways of metal organic framework (MOF-5) *Cryst. Growth Des.*, **13**, 5481–5486. <https://doi.org/10.1021/cg4014619>
- Meshram, A. A. & Sontakke, S. M. (2021). Synthesis of highly stable nanoscale MIL-53 MOF and its application for the treatment of complex mixed dye solutions and real-time dye industry effluent. *Separ. Purif. Technol.*, **274**, 119073. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119073>
- Monama, G. R., Hato, M. J., Ramohlola, K. E., Maponya, T. C., Mdluli, S. B., Molapo, K. M., Modibane, K. D., Iwuoha, E. I., Makgopa, K. & Teffu, M. D. (2019). Hierarchical 4-tetranitro copper (II) phthalocyanine based metal organic framework hybrid composite with improved electrocatalytic efficiency towards hydrogen evolution reaction. *Results Phys.*, **15**, 102564. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102564>
- Moradihamedani, P. (2022). Recent advances in dye removal from wastewater by membrane technology: a review. *Polym. Bull.*, **79**, 1–29. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03603-2>
- Ogawa, T., Kenta, I., Fukushima, T. & Kajikawa, Y. (2017). Landscape of research areas for zeolites and metal-organic frameworks using computational classification based on citation networks. *Materials*, **10**, 1428. <https://doi.org/10.3390/ma10121428>
- Øien-Ødegaard, S., Bouchevreau, B., Hylland, K., Wu, L., Blom, R., Grande, C., Olsbye, U., Tilset, M. & Lillerud, K. P. (2016). UiO-67-type metal–organic frameworks with enhanced water stability and methane adsorption capacity. *Inorg. Chem.*, **55**, 1986–1991. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b02257>
- Panda, J. Sahoo, T., Swain, J., Panda, K. P., Tripathy, Ch. B., Samantaray, R. & Sahu, R. (2023). The journey from porous materials to metal-organic frameworks and their catalytic applications: a review. *Curr. Org. Synth.*, **20**, 220–237. <https://doi.org/10.2174/1570179419666220223093955>
- Panda, J., Sahu, S. N., Pati, R., Panda, P. K., Tripathy, B. C., Payyanayak, S. K. & Sahu, R. (2020). Role of pore volume and surface area of Cu-BTC and MIL-100 (Fe) metal-organic frameworks on the loading of rifampicin: Collective experimental and docking study. *Chem. Select.*, **5**, 12398–12406. <https://doi.org/10.1002/slct.202000728>
- Paul, A., Banga, I. K., Muthukumar, S. & Prasad, S. (2022). Engineering the ZIF-8 pore for electrochemical sensor applications-A mini review. *ACS Omega*, **7**, 26993–27003. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00737>
- Perez, E., Karunaweera, C., Musselman, I., Balkus, K. & Ferraris, J. (2016). Origins and evolution of inorganic-based and MOF-based mixed-matrix membranes for gas separations. *Processes*, **4**, 32. <https://doi.org/10.3390/pr4030032>
- Priyadarshini, M., Das, I. & Ghangrekar, M. M. (2020). Application of metal organic framework in wastewater treatment and detection of pollutants: Review. *J. Indian Chem. Soc.*, **97**, 507–512.
- Rabiee, N. (2023). Sustainable metal-organic frameworks (MOFs) for drug delivery systems. *Mater. Today Commun.*, **35**, 106244. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106244>
- Raja, D. S., Luo, J. H., Wu, C. Y., Cheng, Y. J., Yeh, C. T., Chen, Y. T., Lo, S. H., Lai, Y. L. & Lin, C. H. (2013). Solvothermal synthesis structural diversity, and properties of alkali metal-organic frameworks based on V-shaped ligands. *Crys. Growth Des.*, **13**, 3785–3793. <https://doi.org/10.1021/cg400801s>
- Ramohlola, K. E., Monama, G. R., Hato, M. J., Modibane, K.

- D., Molapo, K. M., Masikini, M., Mduli, S. B. & Iwuoha, E. I. (2018). Polyaniline- metal organic framework nanocomposite as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Compos. B Eng.*, **137**, 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.016>
- Remya, V. R. & Kurian, M. (2019). Synthesis and catalytic applications of metal-organic frameworks: A review on recent literature. *IntNano Lett.*, **9**, 7-29. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0255-1>
- Ru, J., Wang, X., Wang, F., Cui, X., Du, X. & Lu, X. (2021). UiO series of metal-organic frameworks composites as advanced sorbents for the removal of heavy metal ions: Synthesis, applications and adsorption mechanism. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **208**, 111577. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111577>
- Safaei, M., Foroughi, M. M., Ebrahimpour, N., Jahani, S. Omid, A. & Khatami, M. (2019). A review on metal-organic frameworks: Synthesis and applications. *Trends Anal. Chem.*, **118**, 401-425. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.06.007>
- Schukraft, G. & Petit, C. (2020). Green synthesis and engineering applications of metal-organic frameworks. Ed. Szekely, G., Livingston, A. Sust. Nanoscale Eng., Elsevier, 139-162. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814681-1.00006-0>
- Shade, D., Marszalek, B. & Walton, K. S. (2021). Structural similarity, synthesis, and adsorption properties of aluminum-based metal. *Adsorption*, **27**, 227-236 <https://doi.org/10.1007/s10450-020-00282-9>
- Shahid, S. & Nijmeijer, K. (2017). Matrimid®/polysulfone blend mixed matrix membranes containing ZIF-8 nanoparticles for high pressure stability in natural gas separation. *Separ. Purif. Technol.*, **189**, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.075>
- Shan, M., Geng, X., Imaz, I., Broto-Ribas, A., Ortín-Rubio, B., MasPOCH, D., Ansaloni, L., Peters, T. A., Tena, A., Boerrigter, M. E. & Vermaas, D. A. (2024). Metal- and covalent-organic framework mixed matrix membranes for CO₂ separation: A perspective on stability and scalability. *J. Membr. Sci.*, **691**, 122258. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.122258>
- Sran, B. S., Hwang, J. W., Chitale, S. K., Kim, J. C., Cho, K. H., Jo, D., Yoon, J. W., Lee, S. K. & Lee, U. H. (2023). Post-combustion CO₂ capture of methyl and nitro mixed-linker CAU-10. *MRS Communications*, **13**, 343-349. <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00351-4>
- Stock, N. & Biswas, S. (2012). Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): Route to various MOF topologies, morphologies and composites. *Chem. Rev.*, **112**, 933-969. <https://doi.org/10.1021/cr200304e>
- Sun, W., Huo, Y., Feng, X., Wei, L., Lu, X., Liu, S. & Gao, Z. (2025). Recent advances in metal-organic frameworks (MOFs)-based colorimetric sensors for visual detection of food freshness. *Coord. Chem. Rev.*, **535**, 216638. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216638>
- Swan, N. B. & Zaini, M. A. A. (2019). Removal of malachite green and Congo red dyes from water by polyacrylonitrile carbon fibre sorbents. *Acta Chemica Malaysia*, **3**, 29-34. <https://doi.org/10.2478/acmy-2019-0004>
- Tan, P., Zou, N., Sun, J., Long, L., Li, Y. & Yu, J. (2024). Structural insights into amino-modified defective UiO-67: Enhancing phosphate adsorption through multiple active sites synergistic interactions. *Colloid Surface A Physicochem. Eng. Asp.*, **703**, 135338. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135338>
- Tanaka, S. Fuku, K., Ikenaga, N., Sharaf, M. & Nakagawa K., (2024). Recent progress and challenges in the field of metal-organic framework-based membranes for gas separation. *Compounds*, **4**, 141-171. <https://doi.org/10.3390/compounds4010007>
- Thair, Z., Aslam, M., Gilani, M. A., Bilad, M. R., Anjum, M. W., Zhu, L. P. & Khan A. L. (2019). -SO₃H functionalized UiO-66 nanocrystals in polysulfone based mixed matrix membranes: Synthesis and application for efficient CO₂ capture. *Separ. Purif. Technol.*, **224**, 524-533. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.060>
- Tomar, S. & Singh, V. K. (2021). Review on synthesis and application of MIL-53. *Materials Today: Proceedings*, **43**, 3291-3296. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.179>
- Vaitsis, C., Sourkouni, G. & Argiris, C. (2019). Metal organic frameworks (MOFs) and ultrasound: A review. *Ultrason. Sonochem.*, **52**, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasonch.2018.11.004>
- Villegas-Fernández, M. H., Carpio-Granillo, M., Vargas-Hernández, E., Zuno-Cruz, F. J. & Sánchez-Cabrera, G. (2021). Una revisión general de las estructuras metal-orgánicas (MOF) dentro de la química inorgánica. *Publicación Semestral Pädi*, **8**, 18-29. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8i16.5775>
- Wang, C., Ren, G., Wei, K., Liu, D., Wu, T., Jiang, J., Qian, J. & Pan, Y. (2021). Improved dispersion performance and interfacial compatibility of covalent-grafted MOFs in mixed-matrix membranes for gas separation. *Green Chem. Eng.*, **2**, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2020.11.002>
- Wang, H., Zhao, S., Liu, Y., Yao, R., Wang, X., Cao, Y., Ma, D., Zou, M., Cao, A., Feng, X. & Wang, B. (2019). Membrane adsorbers with ultrahigh metal-organic framework loading for high flux separations. *Nature Commun.*, **10**, 4204. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12114-8>
- Wang, T., Zhao, P., Lu, N., Chen, H., Zhang, C. & Hou, X. (2016). Facile fabrication of Fe₃O₄/MIL-101(Cr) for effective removal of acid red 1 and orange G from aqueous solution. *Chem. Eng.*, **295**, 403-413. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.016>
- Wen, J., Fang, Y. & Zeng, G. (2018). Progress and prospect of adsorptive removal of heavy metal ions from aqueous solution using metal-organic frameworks: A review of studies from the last decade. *Chemosphere*, **201**, 627-643. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.047>

- Wintara, J., Meshram, A., Zhu, F., Li, R., Jafar, H., Parmar, K., Liu, J. & Mu, B. (2020). Metal-organic framework-based mixed matrix membranes for gas separation: an overview. *J. Polym. Sci.*, **58**, 2518-2546. <https://doi.org/10.1002/pol.20200122>
- Wu, T., Prasetya, N. & Li, K. (2020). Recent advances in aluminium-based metal-organic frameworks (MOF) and its membrane applications. *J. Memb. Sci.*, **615**, 118493. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118493>
- Yan, C., Wang, J., Zhang, F., Tian, Y., Liu, C., Zhang, F., Cao, L., Zhou, Y. & Han, Q. (2022). Metal-organic frameworks (MOFs) for the efficient removal of contaminants from water: Underlying mechanisms, recent advances, challenges, and future prospects. *Coord. Chem. Rev.*, **468**, 214595. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214595>
- Yang, S., Li, X., Zeng, G., Cheng, M., Huang, D., Liu, Y., Zhou, C., Xiong, W., Yang, Y., Wang, W. & Zhang, G. (2021). Materials Institute Lavoisier (MIL) based materials for photocatalytic applications. *Coord. Chem. Rev.*, **438**, 213874. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213874>
- Yang, Q., Ren, S., Zhao, Q., Lu, R., Hang, C., Chen, Z. & Zheng, H. (2017). Selective separation of methyl orange from water using magnetic ZIF-67 composites. *Chem. Eng. J.*, **333**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.099>
- Yin, Z., Wan, S., Yang, J., Kurmoo, M. & Zeng, M. H. (2019). Recent advances in post-synthetic modification of metal-organic frameworks: New types and tandem reactions. *Coord. Chem. Rev.*, **378**, 500-512. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.11.015>
- Yuan, S., Qin, J.-Sh., Lollar, Ch. T. & Zhou, H. C. (2018). Stable metal-organic frameworks with group 4 Metals: Current status and trends. *ACS Cent. Sci.*, **4**, 440-450. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.8b00073>
- Zadehahmadi, F., Eden, N. T., Mahdavi, H., Konstas, K., Mardel, J. I., Shaibani, M., Banerjee, P. C. & Hill, M. R. (2023). Removal of metals from water using MOF-based composite adsorbents, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, **9**, 1305-1330. <https://doi.org/10.1039/D2EW00941B>
- Zeng, L., Guo, X., He, C. & Duan, C. (2016). Metal-organic frameworks: Versatile materials for heterogeneous photocatalysis. *ACS Catal.*, **6**, 7935-7947. <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b02228>
- Zhai, L., Zheng, X., Liu, M., Wang, X., Li, X., Zhu, X., Yuan, A., Xu, Y. & Song, P. (2023). Tuning surface functionalizations of UiO-66 towards high adsorption capacity and selectivity eliminations for heavy metal ions. *Inorg. Chem. Commun.*, **154**, 110937. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110937>
- Zhang, H., Hu, X., Li, T., Zhang, Y., Sun, Y., Gu, X., Gu, C. & Gao, B. (2022). MIL series of metal organic frameworks (MOFs) as novel adsorbents for heavy metals in water: A review. *J. Hazard. Mater.*, **429**, 128271. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128271>
- Zhang, X., Long, J., Wang, M., Liu, Y. & Ma, H. (2024). Using bifunctionalized NH₂-UiO-66-SO₃H to improve the performance of sulfonated poly (ether ether ketone) in proton exchange membranes. *Inter. J. Hydrogen Energy*, **61**, 1495-1504. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.211>
- Zhang, J. H., Tang, B., Xie, S. M., Wang, B. J., Zhang, M. Chen, X. L., Zi, M. & Yuan, L.M. (2018). Determination of enantiomeric excess by solid phase extraction using a chiral metal organic framework as sorbent. *Molecules*, **23**, 2802. <https://doi.org/10.3390/molecules23112802>
- Zhao, G., Qin, N., Pan, A., Wu, X., Peng, C., Ke, F., Iqbal, M., Ramachandraiah, K. & Zhu, J. (2019). Magnetic Nanoparticles@Metal-Organic Framework composites as sustainable environment adsorbents. *J. Nanomater.*, **2019**, 1454358. <https://doi.org/10.1155/2019/1454358>
- Zhao, H., Huang, X., Jiang, D., Ren, P., Wang, R., Liu, Z., Li, G. & Pu, S. (2024a). Post-synthetic modification of zirconium-based metal-organic frameworks for enhanced simultaneous adsorption of heavy metal ions and organic dyes. *J. Solid State Chem.*, **339**, 124987. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124987>
- Zhao, T., Nie, S., Luo, M., Xiao, P., Zou, M. & Chen, Y. (2024b). Research progress in structural regulation and applications of HKUST-1 and HKUST-1 based materials. *J. Alloys and Compd.*, **974**, 172897. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172897>
- Zhou, M., Ju, Z. & Yuan, D. (2018). A new metal-organic framework constructed from cationic nodes and cationic linkers for highly efficient anion exchange. *Chem. Commun.*, **54**, 2998-3001. <https://doi.org/10.1039/C8CC01225C>
- Zhuang, S., Cheng, R. & Wang, J. (2019). Adsorption of diclofenac from aqueous solution using UiO-66-type metal organic frameworks. *Chem. Eng. J.*, **359**, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.150>
- Zou, D. & Liu, D. (2019). Understanding the modifications and applications of highly stable porous frameworks via UiO-66. *Mater. Today Chem.*, **12**, 139-165. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.12.004>