



ARTÍCULO DE REVISIÓN

MOFs y el Nobel de Química 2025: estructura y aplicaciones farmacéuticas
MOFs and the 2025 Nobel Prize in Chemistry: Structure and Pharmaceutical Applications

Celia Castillo-Blas, Felipe Gándara

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC), C/ Sor Juana Inés de la Cruz 3, 28049, Madrid, España.

e-mail: castillo@icmm.csic.es; gandara@icmm.csic.es

Recibido el 12 de marzo de 2026; aceptado el 16 de marzo de 2026
Disponibile en internet el 31 de marzo de 2026**PALABRAS CLAVE**Redes metalorgánicas
Premio Nobel Química 2025
Química reticular
Porosidad
Liberación controlada de fármacos**RESUMEN**

En 2025, el Premio Nobel de Química reconoció el desarrollo de las redes metalorgánicas conocidas como MOFs por sus siglas en inglés *Metal-organic frameworks*, una familia de materiales porosos que combina ingeniosamente química de coordinación y diseño molecular. Los MOFs están formados por iones metálicos o clústeres unidos a ligandos orgánicos, generando estructuras tridimensionales con cavidades internas accesibles y altamente ordenadas. Las unidades estructurales secundarias (SBUs) actúan como nodos rígidos, conectados por ligandos orgánicos que permiten modular porosidad, tamaño de cavidades y funcionalidad química.

Este premio reconoce los avances clave en la historia de los MOFs incluyen los trabajos de Richard Robson, que construyó las primeras redes tridimensionales con topologías seleccionadas mediante el uso de ligandos multidentados; Susumu Kitagawa, quien demostró que ciertos MOFs conservan su estructura tras evacuar disolventes y pueden expandirse o contraerse en respuesta a estímulos externos; y Omar M. Yaghi, pionero de la química reticular, la isoreticularidad y los MOFs multivariantes, estrategias que permiten diseñar estructuras estables con porosidad permanente y múltiples funcionalidades químicas.

Gracias a su gran superficie interna, versatilidad y poros uniformes, los MOFs se aplican en captura de gases, sistemas de almacenamiento de energía, purificación de agua, catálisis o liberación controlada de fármacos. Su comportamiento dinámico y funcionalización los convierte también en plataformas para sensores y terapias dirigidas. Este Premio Nobel celebra cómo la química moderna puede diseñar materiales desde la molécula a las redes, generando soluciones innovadoras para desafíos ambientales, energéticos y biomédicos del siglo XXI.

DOI: <https://doi.org/10.53519/analesranf>.

ISSN: 1697-4271 E-ISSN: 1697-428X/Derechos Reservados © 2026 Real Academia Nacional de Farmacia.

Este es un artículo de acceso abierto

**KEYWORDS**

MOFs
2025 Chemistry
Nobel Prize
Reticular chemistry
Porosity
Drug delivery

ABSTRACT

Summary: The 2025 Nobel Prize in Chemistry recognized the development of metal-organic frameworks (MOFs), a groundbreaking class of porous materials that merges coordination chemistry with molecular design. MOFs consist of metal ions or clusters linked by organic ligands, forming highly ordered three-dimensional networks with accessible internal cavities. Secondary Building Units (SBUs) serve as rigid nodes, connected by organic ligands that allow precise control of pore size, porosity, and chemical functionality.

This award recognized key historical advances, including those by Richard Robson, who built the first extended 3D networks with selected topologies using multidentate ligands; Susumu Kitagawa, who showed that certain MOFs retain structural integrity after solvent removal and can expand or contract in response to external stimuli; and Omar M. Yaghi, pioneer of reticular chemistry, isorecticular design, and multivariate MOFs, enabling stable frameworks with permanent porosity and multiple chemical functionalities.

Thanks to their enormous surface area, tunability, and uniform pore structures, MOFs are applied in gas capture, energy storage, water purification, catalysis, and controlled drug delivery. Their dynamic behaviour and chemical versatility also make them promising platforms for sensors and targeted therapies. The 2025 Nobel Prize highlights how modern chemistry can design materials from the molecular to the reticular level, creating innovative solutions to environmental, energy, and biomedical challenges of the 21st century.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes metalorgánicas, conocidas internacionalmente como MOFs (*Metal-Organic Frameworks*), constituyen una de las familias de materiales más fascinantes desarrolladas en las últimas décadas dentro de la química de materiales (1). Estos materiales están formados por la unión de iones metálicos o agrupamientos de metales con moléculas orgánicas denominadas ligandos, que actúan como conectores moleculares, a través de enlaces de coordinación. La repetición periódica de estas unidades da lugar a estructuras cristalinas que forman redes tridimensionales altamente ordenadas que contienen cavidades o poros accesibles en su interior.

Un concepto fundamental para comprender la arquitectura de los MOFs es el de unidad estructural secundaria, conocida en inglés como *Secondary Building Unit* (SBU) (2). Una SBU es un pequeño agrupamiento estable de átomos

metálicos frecuentemente coordinado con oxígenos o grupos carboxilato que se comporta como un bloque estructural rígido dentro de la red cristalina (3). Estas unidades funcionan como nodos de conexión a los que se unen los ligandos orgánicos, permitiendo construir redes tridimensionales extensas (**Figura 1.a**). Desde un punto de vista conceptual, los MOFs pueden imaginarse como estructuras de ingeniería o edificios llevados a la escala molecular. En esta analogía, las SBUs actúan como los puntos de unión en un andamio, mientras que los ligandos orgánicos se comportan como vigas o muros de carga que conectan dichos nodos. La repetición periódica de estas unidades genera redes cristalinas con cavidades internas bien definidas, que pueden albergar moléculas de diferentes tamaños, de manera similar a la construcción de un bloque de pisos donde cada habitación puede albergar moléculas y donde se puede hacer química en cada una de ellas de manera controlada

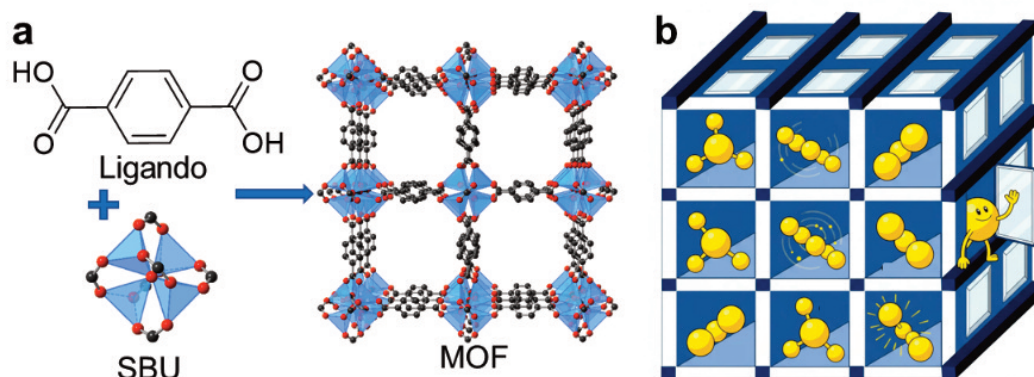


Figura 1. a. Esquema de la formación de la estructura de un MOF mostrando nodos metálicos (SBUs), ligandos orgánicos y cavidades internas. b. Representación de los MOFs que permiten el paso de moléculas y que se puedan alojar en los poros.

(Figura 1.b). Siguiendo esta analogía, y al igual que los edificios pueden ser diseñados con diferentes tipos de habitaciones y estancias adecuadas para uso, las cavidades de los MOFs pueden también ser ajustadas de la manera más apropiada para la función que se les pretenda dar. Precisamente, una de las características más llamativas de los MOFs es su extraordinaria porosidad. Algunos de estos materiales presentan superficies internas superiores a 6000 m² por gramo, lo que significa que una pequeña cantidad de material puede contener una superficie interna comparable a la de varios campos de fútbol. Esta enorme superficie, combinada con la posibilidad de modificar químicamente tanto los centros metálicos como los ligandos orgánicos, confiere a los MOFs una versatilidad química excepcional. Como consecuencia, estos materiales han despertado un enorme interés en campos muy diversos, que abarcan desde la captura de gases de efecto invernadero y la purificación de agua hasta la catálisis heterogénea, la separación de moléculas y el desarrollo de sistemas avanzados de liberación de

2. ANTECEDENTES Y DESARROLLO HISTÓRICO DE LOS MOFS

El reconocimiento mediante el Premio Nobel de Química 2025 de los trabajos en redes metalorgánicas o MOFs representa la culminación de más de tres décadas de investigación en química de coordinación y ciencia de materiales.

El desarrollo de los MOFs se basa en un concepto fundamental: el diseño reticular racional (4). Este principio establece que es posible obtener materiales con un tipo de red buscada seleccionando cuidadosamente sus bloques constructivos, de la misma manera que se arma una torre con piezas de juguete, colocando cada bloque en el lugar correcto para que la estructura no colapse. En el caso de los MOFs, estos bloques son centros metálicos y ligandos orgánicos con geometrías definidas, que al combinarse bajo condiciones adecuadas dan lugar a materiales cuya estructura tiene la arquitectura deseada.

Este enfoque supuso un cambio conceptual profundo respecto a la síntesis tradicional de materiales. Durante gran parte del siglo XX, muchos materiales se descubrieron mediante procedimientos relativamente empíricos, donde el producto final no siempre podía predecirse con precisión. En contraste, los MOFs representan un ejemplo paradigmático de materiales diseñados desde la molécula, donde la estructura final puede preverse mediante principios geométricos y químicos.

Los tres investigadores que impulsaron decisivamente este campo - Richard Robson, Susumu Kitagawa y Omar M. Yaghi - convirtieron un concepto teórico en una plataforma de materiales con un impacto científico y tecnológico extraordinario.

2.1. Richard Robson: los primeros marcos metalorgánicos

Los orígenes del campo de los MOFs se remontan a finales de los años ochenta, cuando el químico británico Richard Robson, de la Universidad de Melbourne, propuso una idea innovadora basada en la química de coordinación. En 1989, Robson y su equipo exploraron la posibilidad de obtener compuestos de coordinación, cuya estructura forme una red tridimensional con una conectividad y topología específicamente buscada, utilizando iones metálicos y ligandos orgánicos multidentados (5). En uno de sus trabajos más influyentes, combinaron iones de cobre (Cu^+) con ligandos orgánicos neutros diseñados específicamente para actuar como conectores tetradentados. Estos ligandos poseían cuatro brazos con grupos funcionales ciano ($-\text{CN}$) capaces de coordinar simultáneamente varios centros metálicos. Cuando estos componentes se combinaban en disolución bajo condiciones controladas, dieron lugar a cristales, cuya estructura resultante presentaba la misma topología que el diamante, donde los iones de cobre y los átomos centrales del ligando orgánico ocupan las posiciones de los nodos en la red, dando lugar a cavidades internas interco-

nectadas. Sin embargo, la red tenía una naturaleza catiónica, al poseer ligandos neutros, Cu^+ como único centro metálico y los contraniones de la sal de cobre quedaban dentro de las cavidades para mantener la electro-neutralidad del material. La obtención deliberada de una topología específica, representó un avance conceptual notable, ya que demostraba que era posible sintetizar materiales cristalinos con redes extensas, y que al formarse estas redes se generan cavidades moleculares (6). Sin embargo, estos primeros materiales presentaban un problema importante: su estabilidad estructural era limitada. Los poros de estas redes estaban inicialmente ocupados por moléculas de disolvente y de los contraniones de la sal metálica, que estabilizaban la estructura. Cuando dichos disolventes se eliminaban, el marco cristalino colapsaba, perdiendo su porosidad. Aunque esta limitación parecía restringir las posibles aplicaciones prácticas, los trabajos de Robson establecieron por primera vez las bases conceptuales del campo y demostraron que la química de coordinación podía utilizarse para construir redes cristalinas tridimensionales prediseñadas. La forma en que estas limitaciones iniciales fueron abordadas marcaron nuevos hitos en el desarrollo del campo.

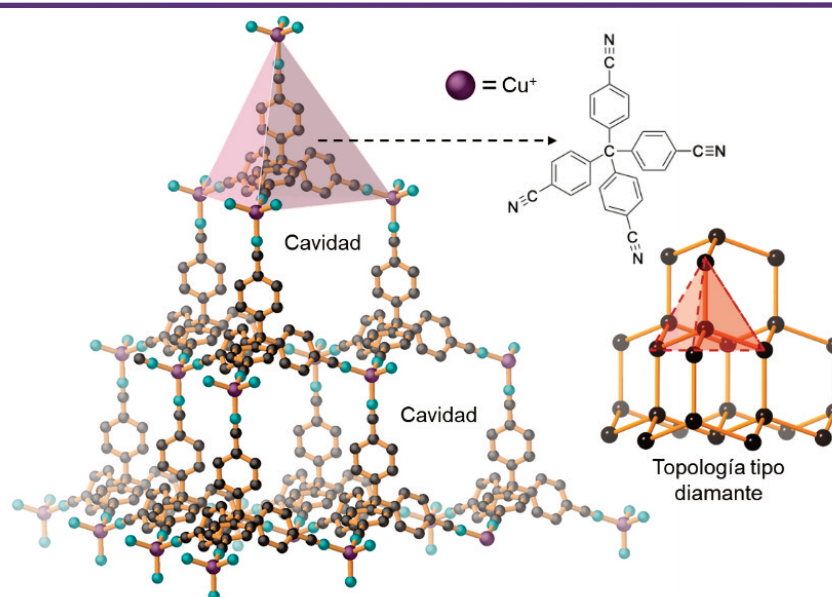


Figura 2. Representación simplificada de las primeras redes metalorgánicas propuestas por Robson.



2.2. Susumu Kitagawa: porosidad y flexibilidad

El siguiente gran avance en el desarrollo de los marcos metalorgánicos (MOFs) se produjo gracias al trabajo del químico japonés Susumu Kitagawa, profesor de la Universidad de Kioto y uno de los investigadores que transformó profundamente la comprensión de estos materiales. A comienzos de la década de 1990, cuando el campo de los MOFs, también conocidos como polímeros de coordinación, todavía se encontraba en una fase relativamente temprana, Kitagawa y su grupo comenzaron a investigar de forma sistemática las propiedades estructurales y funcionales de redes cristalinas formadas por la coordinación entre centros metálicos y ligandos orgánicos.

Entre principios de los años noventa y comienzos del siglo XXI, las investigaciones de su grupo demostraron que estos materiales no solo podían formar estructuras cristalinas extensas, sino que también podían presentar porosidad accesible y propiedades dinámicas, lo que representó un cambio conceptual muy importante. Hasta ese momento, muchos polímeros de coordinación se consideraban estructuras curiosas desde el punto de vista cristalográfico, pero con escasa utilidad práctica debido a su limitada estabilidad estructural una vez eliminadas las moléculas de disolvente o contraniones presentes en sus cavidades. Uno de los descubrimientos más relevantes del grupo de Kitagawa fue demostrar de manera experimental que determinadas redes metalorgánicas podían adsorber moléculas gaseosas dentro de sus poros sin que la estructura cristalina colapsara (7). Este resultado fue crucial, ya que indicaba que la estabilidad estructural de estos materiales no dependía necesariamente de la presencia permanente de moléculas huésped o disolventes que actuaran como soportes internos del entramado cristalino. En otras palabras, el esqueleto del MOF, en ese momento llamado polímero de coordinación poroso, podía mantenerse intacto incluso tras la evacuación del

disolvente, conservando cavidades accesibles capaces de alojar nuevas moléculas. Este comportamiento estructural estable y reversible permitió comenzar a considerar los MOFs como materiales porosos funcionales, comparables a otros sólidos microporosos como las zeolitas, pero con una versatilidad química y estructural mucho mayor debido a la enorme variedad de combinaciones posibles entre metales y ligandos orgánicos (8).

Además de demostrar la estabilidad estructural de estos materiales, Kitagawa también descubrió que muchos MOFs presentan flexibilidad estructural significativa (9,10). En contraste con la rigidez característica de muchos sólidos inorgánicos cristalinos, algunos MOFs son capaces de experimentar cambios estructurales reversibles cuando se exponen a estímulos externos. Este fenómeno dinámico, conocido posteriormente como *breathing behaviour* o comportamiento de “respiración”, (11) se caracteriza por la expansión o contracción del volumen de los poros del material en respuesta a factores como la presión, la temperatura o la presencia de determinadas moléculas adsorbidas (12,13). Desde el punto de vista estructural, este comportamiento se origina en la relativa flexibilidad de los enlaces de coordinación metal-ligando que constituyen la red cristalina. A diferencia de los enlaces rígidos que dominan en muchos materiales puramente inorgánicos, los enlaces de coordinación pueden permitir pequeñas rotaciones, distorsiones geométricas o reorganizaciones cooperativas que facilitan cambios en la arquitectura global del material sin destruir la conectividad del entramado. De hecho, en algunos MOFs flexibles, la adsorción de moléculas huésped puede inducir transiciones estructurales cooperativas, en las que la estructura cristalina cambia de una fase más compacta a otra más abierta (14). Estas transformaciones pueden modificar de forma significativa el volumen accesible de los poros, lo que influye directamente en las propiedades de adsorción y separación de moléculas. El descubrimiento de estos fenómenos dinámicos abrió nuevas posibilidades para el desarrollo

de materiales inteligentes capaces de responder de forma selectiva a estímulos químicos o físicos (15). En particular, los MOFs flexibles comenzaron a considerarse candidatos prometedores para aplicaciones en almacenamiento de gases (16), separación molecular (17) y sensores químicos (18), donde la respuesta estructural del material puede utilizarse para mejorar la selectividad o la eficiencia de los procesos de adsorción.

Las contribuciones de Kitagawa fueron por tanto fundamentales para demostrar que los MOFs no solo son estructuras cristalinas altamente ordenadas, sino también materiales dinámicos capaces de adaptarse a su entorno, una característica que continúa siendo objeto de intensa investigación en el campo de los materiales porosos avanzados.

2.3. Omar M. Yaghi: diseño racional y química reticular

El desarrollo definitivo de las redes metal-orgánicas como una plataforma robusta de materiales porosos se debe en gran medida a las contribuciones del químico jordano-estadounidense Omar M. Yaghi, cuya investigación sentó las bases conceptuales para el diseño racional de estos materiales y, al que se le considera el padre de la química reticular (19). La química reticular es la disciplina que diseña y construye estructuras tridimensionales ordenadas mediante la unión predecible de blo-

ques moleculares como nodos metálicos y ligandos orgánicos (20,21). Su objetivo es crear materiales con propiedades controladas, como porosidad, funcionalización química y estabilidad estructural.

Durante la década de 1990, paralelamente a los experimentos de Robson y Kitagawa, Yaghi y sus colaboradores demostraron que era posible sintetizar redes de coordinación con cavidades a los que denominó *Metal-organic frameworks* ahora ya conocidos popularmente como MOFs (22). Estos poseían porosidad permanente y estabilidad estructural incluso después de eliminar completamente las moléculas de disolvente presentes en los poros. Este avance fue particularmente importante, ya que, como observaron Kitagawa o Robson, muchos de los polímeros de coordinación conocidos hasta ese momento perdían su estructura cristalina cuando se intentaba evacuar el disolvente atrapado en las cavidades internas. Para conseguir esa mayor estabilidad, Yaghi utilizó ligandos con grupos coordinantes aniónicos, tales como ácidos carboxílicos. El uso de estos ligandos, por un lado permitió obtener redes neutras, sin presencia de contraiones en los poros, y por otro lado, proveer una mayor fortaleza de enlace con los metales. Como resultado, el grupo de Yaghi mostró por primera vez que es posible realizar isotermas de adsorción de gases en régimen de baja presión en MOFs. Esta técnica permite cuantificar la superficie específica de

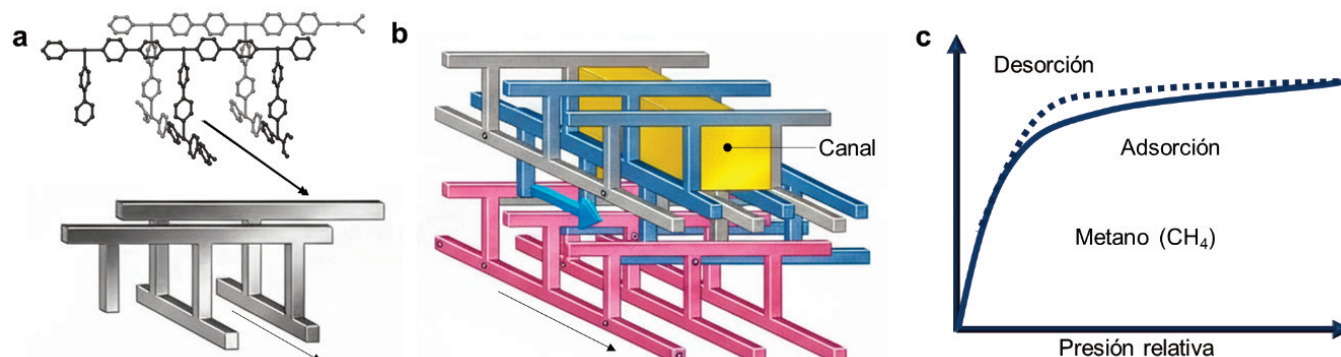


Figura 3. a. Equivalencia de los polímeros de coordinación porosos formados por Kitagawa y su simplificación estructural. b. Figura de cómo se forman los canales de abiertos que fueron descritos por Kitagawa por primera vez en 1997. c. Isotherma de adsorción de este material que era capaz de adsorber de manera reversible metano.



cualquier sólido microporoso, lo que puso a los MOFs de lleno en el centro de interés del campo de materiales porosos.

Uno de los ejemplos más emblemáticos de esta nueva generación de materiales es MOF-5, también conocido como IRMOF-1. Este material está formado por unidades metálicas Zn_4O que actúan como SBUs cuando se coordinan a los grupos carboxílicos de los ligandos orgánicos (23). Estas SBUs se conectan entre sí mediante el ligando tereftalato (1,4-bencendicarboxilato), forma desprotonada del ácido tereftálico, formando una red tridimensional altamente ordenada y extremadamente porosa. La estructura resultante, que presenta una red primitiva cúbica (pcu) y genera cavidades internas amplias y accesibles ya que cuenta con una gran superficie específica ($\sim 2500 \text{ m}^2/\text{g}$), lo que permite la difusión y adsorción de moléculas pequeñas dentro del material. Además, el MOF-5 presenta una estabilidad estructural notable tras la activación del material, es decir, tras la eliminación del disolvente atrapado en los poros.

Uno de los conceptos más influyentes introducidos por Yaghi fue el principio de isorecticularidad, que constituye uno de los pilares del diseño moderno de MOFs. Este principio establece que es posible construir familias completas de materiales que comparten la misma topología estructural, es decir, que mantiene la misma conectividad entre SBUs y ligandos, modificando únicamente la longitud o la funcionalidad de los ligandos orgánicos que conectan las unidades metálicas. Siguiendo esta estrategia, si los ligandos orgánicos de MOF-5 se sustituyen por moléculas más largas pero con la misma geometría de coordinación, se obtienen estructuras análogas conocidas como IRMOFs (*Isorecticular Metal-Organic Frameworks*). En estas estructuras, el tamaño de los poros aumenta progresivamente a medida que se incrementa la longitud de los ligandos, mientras que la conectividad global de la red cristalina permanece esencialmente inalterada (24). Este enfoque permitió a los investigadores diseñar materiales con tamaños de poro controlados de forma precisa, lo que resultó fundamental para aplicaciones en alma-

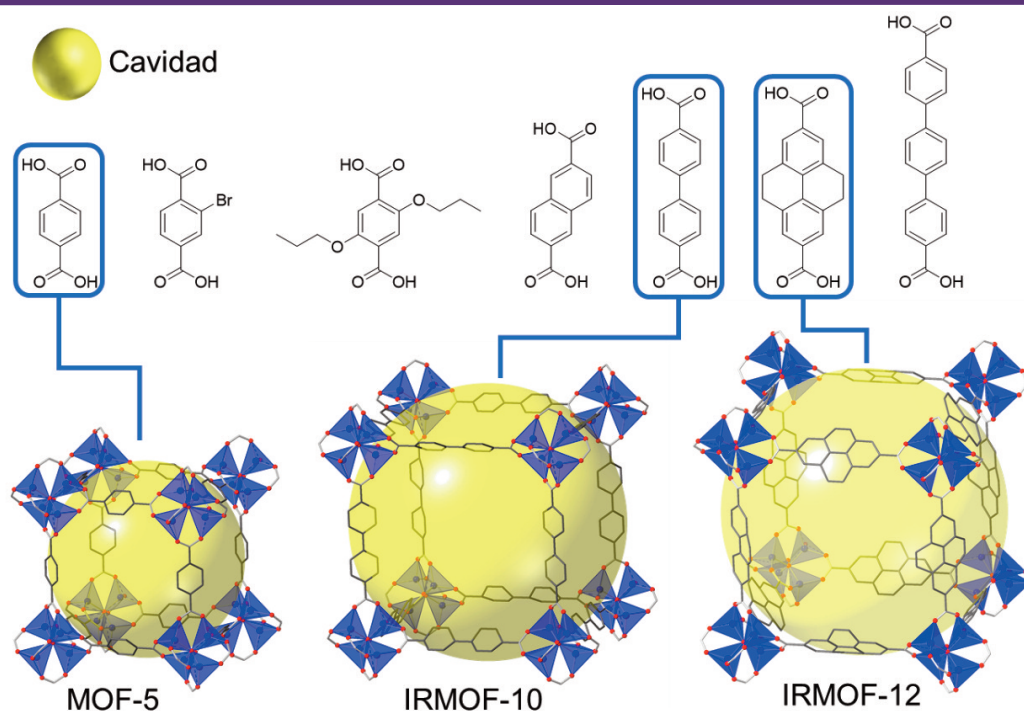


Figura 4. Estructura cristalina del MOF-5 y sus derivados usando el principio de la isorecticularidad mostrando la red tridimensional y sus cavidades internas, al mismo tiempo que la topología de la red se mantiene.



cenamiento de gases o captura de dióxido de carbono y moléculas más grande, llegando incluso a encapsularse proteínas dentro de los poros de un MOF gracias a este principio (25).

Otro desarrollo importante derivado de esta filosofía de diseño ha sido el concepto de MOFs multivariado o MTV-MOFs (26). En estos materiales, diferentes ligandos orgánicos o incluso diferentes metales se incorporan simultáneamente dentro de la misma estructura cristalina (27). Como resultado, el interior de los poros puede presentar múltiples entornos químicos y funcionalidades, lo que aumenta significativamente la complejidad y versatilidad funcional del material, llegando a controlarse las secuencias de los metales en la SBU (28,29).

Esta estrategia permite crear materiales con propiedades altamente ajustables, capaces de combinar múltiples funciones dentro de un mismo sólido poroso, lo que resulta particularmente atractivo para aplicaciones en catálisis, separación molecular o captura selectiva de contaminantes.

2.4. Arquitectura y propiedades de los MOFs

Los marcos metalorgánicos presentan una combinación de propiedades estructurales y químicas que los distingue claramente de otros materiales porosos tradicionales, como las zeolitas, los carbones activados o los materiales mesoporosos de sílice. Como hemos visto, una de las características más destacadas de los MOFs es que su arquitectura puede diseñarse racionalmente a nivel molecular. La selección adecuada de los centros metálicos y de los ligandos orgánicos permite controlar parámetros estructurales fundamentales como la conectividad de la red, la geometría de los poros y la distribución espacial de los sitios activos.

Desde el punto de vista estructural, los MOFs se construyen mediante la repetición periódica de unidades estructurales secundarias (SBUs) que actúan como nodos de conexión dentro de la red cristalina. Estas unidades

pueden adoptar diversas geometrías de coordinación, incluyendo configuraciones tetraédricas, octaédricas o más complejas como la presencia de oxoclusters discretos (30) o *oxoclusters* con forma de bastones (31) que se extienden a lo largo de una o dos dimensiones (3). Los ligandos orgánicos, por su parte, funcionan como puentes que enlazan estas unidades metálicas, dando lugar a redes tridimensionales altamente ordenadas. La versatilidad de esta química es extraordinaria (32). Los nodos metálicos pueden estar formados por prácticamente cualquier metal de transición, metales alcalinos, alcalinotérreos, lantánidos e incluso mezclas de metales, lo que permite ajustar la estabilidad química, la reactividad y la afinidad por moléculas huéspedes. Por su parte, los ligandos orgánicos también ofrecen una diversidad enorme: se emplean ácidos carboxílicos, imidazolatos, fosfonatos, tetrazolatos, bipyridinas, poliarilos y muchas otras estructuras aromáticas o alifáticas, lineales o angulares, que determinan la topología, tamaño y forma de los poros. Gracias a esta combinación casi ilimitada de metales y ligandos, los MOFs pueden adoptar una enorme variedad de topologías y tamaños de poro, desde estructuras ultramicroporosas hasta redes con cavidades mesoporosas, adaptándose a funciones específicas como almacenamiento de gases, (33) catálisis selectiva, (34) transporte de moléculas y liberación controlada de fármacos (35). Esta modularidad estructural convierte a los MOFs en una plataforma extraordinariamente versátil dentro de la química de materiales.

Una consecuencia directa de esta arquitectura modular es la extraordinaria porosidad que pueden alcanzar estos materiales. En muchos MOFs, el volumen de poro representa una fracción significativa del volumen total del cristal, lo que se traduce en superficies internas extremadamente grandes. Por ejemplo, el MOF-5 presenta valores de área superficial del orden de 2600-3000 m²/g, aunque algunos MOFs más recientes han superado ampliamente estos valores, superando los 7000 m²/g



reportados de manera experimental en el MOF conocido como NU-110 (36).

Otra propiedad fundamental es la posibilidad de funcionalizar químicamente los ligandos orgánicos que forman la estructura del material. Mediante la introducción de grupos funcionales específicos como aminas, grupos hidroxilo o grupos sulfonato es posible modificar las interacciones químicas entre el marco cristalino y las moléculas adsorbidas (37). Esta capacidad de modificación química permite adaptar el comportamiento del material para aplicaciones muy diversas, desde procesos catalíticos hasta separación selectiva de gases o captura de contaminantes.

Asimismo, la naturaleza cristalina de los MOFs implica que los poros presentan una distribución extremadamente regular y ordenada, lo que facilita tanto el transporte de moléculas dentro del material como la posibilidad de modificar post-sintéticamente el material para inducir nuevas propiedades (38,39). Esta uniformidad estructural y el control a nivel atómico que se consigue contrasta con la distribución más heterogénea de poros y la naturaleza amorfa que se encuentra en otros materiales adsorbentes, como el carbón activado.

2.5. Aplicaciones y perspectivas

Las propiedades estructurales y químicas de las redes metalorgánicas han generado un enorme interés en múltiples áreas científicas y tecnológicas. Gracias a su elevada porosidad, su capacidad de funcionalización química y su estructura altamente ordenada, estos materiales se consideran candidatos prometedores para una amplia variedad desde aplicaciones industriales a aplicaciones medioambientales y biomédicas.

Una de las aplicaciones más estudiadas es la captura de gases, como el dióxido de carbono, un problema de gran relevancia en el contexto del cambio climático global. Diversos MOFs presentan afinidad selectiva por moléculas de CO₂ debido a la presencia de sitios metálicos

abiertos o grupos funcionales polares dentro de los poros. Estos materiales pueden utilizarse para capturar dióxido de carbono procedente de emisiones industriales o incluso directamente de la atmósfera mediante procesos de adsorción selectiva (40). Además, los MOFs se investigan intensamente para el almacenamiento de gases como hidrógeno o metano (41,42). La elevada superficie interna y la gran capacidad de adsorción de estos materiales permiten almacenar cantidades significativas de gas en volúmenes relativamente pequeños, lo que resulta especialmente interesante para aplicaciones energéticas. De manera análoga, ciertos MOFs con alta estabilidad en agua muestran un gran potencial para la captura de agua en fase vapor directamente del ambiente, incluso en condiciones de baja humedad relativa, lo que permite extraer agua del aire en regiones áridas (43). Esta propiedad se debe a la combinación de poros hidrofílicos y alta superficie interna, que favorece la condensación de vapor y su posterior liberación mediante calentamiento controlado, ofreciendo soluciones innovadoras para la producción sostenible de agua potable a través de dispositivos que contienen estos materiales en condiciones desérticas (44).

En el ámbito de la protección química y seguridad industrial, algunos MOFs han demostrado ser eficaces para la captura y neutralización de compuestos tóxicos, incluyendo cloro, amoníaco o compuestos organofosforados (45). Estas propiedades los convierten en materiales potencialmente útiles para sistemas de filtración avanzada o dispositivos de protección personal.

Finalmente, en el campo de la catálisis heterogénea, los MOFs pueden actuar como microreactores en los que las reacciones químicas se producen dentro de los poros del material. La presencia de centros metálicos catalíticamente activos o grupos funcionales específicos dentro de la estructura permite promover reacciones químicas con alta selectividad e incluso con quiralidad deseada (46, 47).



2.6. Aplicaciones biomédicas y en el campo de la farmacia

El desarrollo de las redes metalorgánicas no solo ha tenido un impacto significativo en áreas como la captura de gases o la catálisis, sino que también ha abierto nuevas oportunidades en el ámbito de la farmacia, la medicina y la salud. Gracias a su elevada porosidad, superficie interna masiva y versatilidad química, los MOFs se han convertido en una plataforma muy prometedora para abordar algunos de los desafíos más importantes relacionados con la presencia de tóxicos emergentes en el medio ambiente, como disruptores endocrinos o compuestos farmacéuticos y con el desarrollo de nuevas estrategias de administración de fármacos (48,49).

Una de las áreas de investigación más activas es la eliminación de residuos en general y residuos farmacéuticos de manera particular presentes en aguas residuales, un problema creciente asociado al uso masivo de medicamentos (50). Tras su consumo, muchos fármacos no se metabolizan completamente en el organismo y son excretados en forma activa o como metabolitos. Estas moléculas llegan a las redes de saneamiento y, aunque los sistemas convencionales de tratamiento de aguas eliminan una fracción importante de contaminantes, numerosos compuestos farmacéuticos permanecen en el efluente final. Entre las sustancias detectadas con mayor frecuencia se encuentran antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, hormonas sintéticas, antidepresivos y fármacos antiepilépticos. La presencia continuada de estos compuestos en el medio acuático plantea riesgos ambientales y sanitarios, incluyendo el desarrollo de resistencias bacterianas a antibióticos, alteraciones endocrinas en organismos acuáticos y posibles efectos a largo plazo en la salud humana.

Para abordar este problema, en los últimos años se ha desarrollado el concepto de tratamiento cuaternario de aguas, una etapa adicional posterior al tratamiento terciario que busca eliminar contaminantes emergentes me-

dante tecnologías avanzadas de adsorción, oxidación o membranas (51). En este contexto, los MOFs han emergido como adsorbentes altamente eficientes para la captura de moléculas farmacéuticas (52). La elevada superficie interna de estos materiales, combinada con la posibilidad de modificar químicamente los ligandos orgánicos, permite diseñar MOFs capaces de interactuar selectivamente con determinados compuestos farmacológicos. Las interacciones responsables de la adsorción pueden incluir interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno, interacciones π - π entre anillos aromáticos y fuerzas de van der Waals, dependiendo de la naturaleza química del fármaco y del entorno químico del material. Diversos estudios han demostrado la capacidad de ciertos MOFs para capturar eficientemente diclofenaco, ibuprofeno, sulfametoxazol, carbamazepina o estradiol, entre otros compuestos (52,53). En algunos casos, las capacidades de adsorción superan ampliamente las obtenidas con materiales tradicionales como el carbón activado o determinadas zeolitas. Además, debido a su naturaleza cristalina, la distribución de poros en los MOFs es altamente uniforme, lo que facilita el acceso de las moléculas contaminantes a los sitios activos internos. Otro aspecto de gran interés es la posibilidad de regenerar los MOFs tras el proceso de adsorción, permitiendo su reutilización en ciclos sucesivos de purificación de agua. Esta característica resulta fundamental desde el punto de vista económico y medioambiental, ya que reduce la necesidad de reemplazar constantemente el material adsorbente.

Más allá de las aplicaciones ambientales, los MOFs también han despertado un enorme interés en el campo de la administración controlada de fármacos (*drug delivery*) (54). Los sistemas tradicionales de administración farmacológica suelen presentar limitaciones relacionadas con la baja solubilidad de algunos principios activos, la rápida eliminación del organismo o la falta de selectividad hacia el tejido diana. Como consecuencia, se requieren



dosis relativamente elevadas, lo que puede incrementar el riesgo de efectos secundarios. Los MOFs ofrecen una alternativa interesante gracias su biocompatibilidad y a su capacidad para encapsular moléculas farmacéuticas dentro de sus cavidades internas (55). Este proceso, conocido como *drug loading*, permite almacenar cantidades significativas de principio activo dentro del material. Posteriormente, el fármaco puede liberarse de manera controlada mediante distintos mecanismos, como la difusión a través de los poros, la degradación progresiva del material o la respuesta a estímulos externos.

Uno de los aspectos más atractivos de estos sistemas es la posibilidad de diseñar materiales con liberación controlada y sostenida en el tiempo. Esto puede lograrse ajustando el tamaño de los poros, modificando químicamente los ligandos o seleccionando centros metálicos con diferentes estabilidades químicas. En algunos casos, los MOFs pueden responder a estímulos específicos del entorno biológico, como cambios de pH, presencia de determinadas enzimas o condiciones redox particulares (56). Por ejemplo, ciertos MOFs han sido diseñados para liberar fármacos de manera preferencial en entornos ligeramente ácidos, como los que se encuentran en algunos tumores sólidos. Este tipo de comportamiento permite desarrollar estrategias de liberación dirigida, donde el medicamento se libera mayoritariamente en el tejido enfermo por un estímulo como puede ser el pH, reduciendo su impacto sobre células sanas (57). Además de su uso como sistemas de liberación de fármacos, los MOFs también están siendo investigados como plataformas multifuncionales en nanomedicina. Algunos materiales pueden combinar simultáneamente funciones de transporte de fármacos, diagnóstico por imagen y terapia (58) Por ejemplo, ciertos MOFs que incorporan metales con propiedades magnéticas o fluorescentes pueden utilizarse como agentes de contraste en técnicas de imagen médica, mientras transportan simultáneamente moléculas terapéuticas (59).

Otra aplicación emergente es el uso de MOFs en terapias antimicrobianas avanzadas (60). Algunos materiales liberan lentamente iones metálicos con actividad bactericida, como plata o cobre, mientras que otros pueden actuar como plataformas para la liberación controlada de antibióticos. Esta aproximación podría contribuir al desarrollo de nuevas estrategias para combatir infecciones resistentes a múltiples fármacos.

En el campo de la oncología, también se están explorando MOFs capaces de actuar como agentes para terapia fotodinámica o fototérmica (61,62). En estos sistemas, el material incorpora moléculas fotosensibilizadoras que, al ser activadas mediante radiación luminosa, generan especies reactivas capaces de destruir células tumorales.

El potencial de los MOFs en biomedicina se extiende incluso a áreas como la ingeniería de tejidos o el desarrollo de biosensores (63). Su elevada área superficial y su capacidad de funcionalización permiten inmovilizar biomoléculas como enzimas, anticuerpos o fragmentos de ADN, lo que facilita el diseño de dispositivos de detección altamente sensibles (64). En conjunto, estas aplicaciones ilustran cómo los MOFs pueden desempeñar un papel importante en la intersección entre química de materiales, farmacia, medicina y tecnología ambiental. A medida que se profundiza en la comprensión de su estabilidad biológica, su toxicidad potencial y su comportamiento en entornos fisiológicos, es probable que estos materiales continúen expandiendo su presencia en el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas para la salud humana y la protección del medio ambiente.

3. CONCLUSIONES

Las redes metalorgánicas representan un ejemplo notable de cómo la investigación fundamental en química de materiales puede contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas para algunos de los desafíos más importantes del siglo XXI. Su desarrollo ha sido posible gracias a la convergencia de diferentes



áreas de la química, incluyendo la química de coordinación, química orgánica, y la ciencia de materiales, lo que ha permitido diseñar estructuras cristalinas altamente ordenadas con propiedades ajustables a escala molecular.

Los trabajos pioneros de Richard Robson demostraron que era posible construir redes tridimensionales con topologías previamente seleccionadas mediante la combinación de iones metálicos y ligandos orgánicos. Posteriormente, las investigaciones de Susumu Kitagawa pusieron de manifiesto que estos materiales podían presentar estabilidad estructural y comportamientos dinámicos complejos, ampliando significativamente su potencial funcional. Finalmente, el desarrollo del concepto de química reticular y el principio de isoreticularidad introducidos por Omar M. Yaghi permitieron establecer estrategias de diseño racional que impulsaron el crecimiento exponencial del campo, y su translación a aplicaciones a nivel industrial.

Gracias a su extraordinaria porosidad, su elevada superficie interna y su capacidad de funcionalización química, los MOFs se han consolidado como materiales altamente versátiles con aplicaciones potenciales en numerosos ámbitos tecnológicos. Entre ellos destacan la captura de gases de efecto invernadero, la purificación de agua, el almacenamiento energético, la catálisis heterogénea y el desarrollo de sistemas avanzados de liberación de fármacos. Asimismo, el creciente interés en aplicaciones biomédicas y farmacéuticas, junto con el desarrollo de estrategias de síntesis más sostenibles, sugiere que los MOFs continuarán desempeñando un papel relevante en el desarrollo de tecnologías destinadas a afrontar desafíos globales relacionados con la salud, la energía y el medio ambiente.

En conjunto, los MOFs constituyen una plataforma científica de enorme proyección futura. El continuo descubrimiento de nuevas estructuras, la mejora de sus propiedades funcionales y el desarrollo de métodos de caracterización más avanzados permitirán ampliar aún más su impacto en múltiples disciplinas científicas y tecnológicas.

4. REFERENCIAS

1. Furukawa H, Cordova KE, O'Keeffe M, Yaghi OM. The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks. *Science* 2013; 341: 1230444.
2. Férey G. Building Units Design and Scale Chemistry. *J Solid State Chem* 2000; 152: 37-48.
3. Eddaoudi M, Moler DB, Li H, Chen B, Reineke TM, O'Keeffe M, Yaghi OM. Modular Chemistry: Secondary Building Units as a Basis for the Design of Highly Porous and Robust Metal-Organic Carboxylate Frameworks. *Acc Chem Res* 2001; 34: 319-330.
4. Férey G. Microporous Solids: From Organically Templated Inorganic Skeletons to Hybrid Frameworks...Ecumenism in Chemistry. *Chem Mater* 2001; 13(10): 3084-3098.
5. Hoskins BF, Robson R. Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments. *J Am Chem Soc* 1989; 111(15): 5962-5964.
6. Hoskins BF, Robson R. Design and construction of a new class of scaffolding-like materials comprising infinite polymeric frameworks of 3D-linked molecular rods. A reappraisal of the zinc cyanide and cadmium cyanide structures and the synthesis and structure of the diamond-related frameworks $[N(CH_3)_4][CuZnII(CN)_4]$ and $CuI[4,4',4'',4''']$ -tetracyanotetraphenylmethane $BF_4 \cdot xC_6H_5NO_2$. *J Am Chem Soc* 1990; 112(4): 1546-1554.
7. Kitagawa S, Kitaura R, Noro S. Functional Porous Coordination Polymers. *Angew Chem Int Ed* 2004; 43: 2334-2375. Kondo M, Yoshitomi T, Matsuzaka H, Kitagawa S, Seki K. Three-Dimensional Framework with Channeling Cavities for Small Molecules: $\{[M_2(4,4'-bpy)_3(NO_3)_4] \cdot xH_2O\}_n$ ($M = Co, Ni, Zn$). *Angew Chem Int Ed* 1997; 36: 1725-1727.
8. Kitagawa S, Kitaura R, Noro S. Functional Porous Coordination Polymers. *Angew Chem Int Ed* 2004; 43: 2334-2375.
9. Horike S, Shimomura S, Kitagawa S. Soft porous crystals. *Nat Chem* 2009; 1: 695-704.
10. Uemura K, Matsuda R, Kitagawa S. Flexible microporous coordination polymers. *J Solid State Chem* 2005; 178: 2420-2429.
11. Serre C, Bourrelly S, Vimont A, Ramsahye NA, Maurin G, Llewellyn PL, Daturi M, Filinchuk Y, Leynaud O, Barnes P, Férey G. An Explana-



- tion for the Very Large Breathing Effect of a Metal-Organic Framework during CO₂ Adsorption. *Adv Mater* 2007; 19: 2246-2251.
12. Schneemann A, Bon V, Schwedler I, Senkovska I, Kaskel S, Fischer RA. Flexible metal-organic frameworks. *Chem Soc Rev* 2014; 43: 6062-6096.
 13. Takashima Y, Martínez VM, Furukawa S, Kondo M, Shimomura S, Uehara H, Nakahama M, Sugimoto K, Kitagawa S. Molecular decoding using luminescence from an entangled porous framework. *Nat Commun* 2011; 2: 168.
 14. Seo J, Bonneau C, Matsuda R, Takata M, Kitagawa S. Soft Secondary Building Unit: Dynamic Bond Rearrangement on Multinuclear Core of Porous Coordination Polymers in Gas Media. *J Am Chem Soc* 2011; 133: 9005-9013.
 15. Yanai N, Kitayama K, Hijikata Y, Sato H, Matsuda R, Kubota Y, Takata M, Mizuno M, Uemura T, Kitagawa S. Gas detection by structural variations of fluorescent guest molecules in a flexible porous coordination polymer. *Nat Mater* 2011; 10: 787-793.
 16. Senkovska I, Bon V, Mosberger A, Wang Y, Kaskel S. Adsorption and Separation by Flexible MOFs. *Adv Mater* 2025; 37: 2414724.
 17. Sato H, Kosaka W, Matsuda R, Hori A, Hijikata Y, Belosludov RV, Sakaki S, Takata M, Kitagawa S. Self-Accelerating CO Sorption in a Soft Nanoporous Crystal. *Science* 2014; 343: 167-170.
 18. Gong D, Li X, Chen Y, Jiao T. Recent progress in MOF-based flexible sensors: A review. *Sustain Mater Technol* 2025; 44: e01429.
 19. Yaghi OM. Reticular Chemistry in All Dimensions. *ACS Cent Sci* 2019; 5: 1295-1300.
 20. Jiang H, Alezi D, Eddaoudi M. A reticular chemistry guide for the design of periodic solids. *Nat Rev Mater* 2021; 6: 466-487.
 21. O'Keeffe M, Eddaoudi M, Li H, Reineke T, Yaghi OM. Frameworks for Extended Solids: Geometrical Design Principles. *J Solid State Chem* 2000; 152: 3-20.
 22. Yaghi OM, Li G, Li H. Selective binding and removal of guests in a microporous metal-organic framework. *Nature* 1995; 378: 703-706.
 23. Li H, Eddaoudi M, O'Keeffe M, Yaghi OM. Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework. *Nature* 1999; 402: 276-279.
 24. Furukawa H, Ko N, Go YB, Aratani N, Choi SB, Choi E, Yazaydin AÖ, Snurr RQ, O'Keeffe M, Kim J, Yaghi OM. Ultrahigh Porosity in Metal-Organic Frameworks. *Science* 2010; 329: 424-428.
 25. Deng H, Grunder S, Cordova KE, Valente C, Furukawa H, Hmadeh M, Gándara F, Whalley AC, Liu Z, Asahina S, Kazumori H, O'Keeffe M, Terasaki O, Stoddart JF, Yaghi OM. Large-Pore Apertures in a Series of Metal-Organic Frameworks. *Science* 2012; 336: 1018-1023.
 26. Deng H, Doonan CJ, Furukawa H, Ferreira RB, Towne J, Knobler CB, Wang B, Yaghi OM. Multiple Functional Groups of Varying Ratios in Metal-Organic Frameworks. *Science* 2010; 327: 846-850.
 27. Burigana M, Wang H, Elmroth Nordlander J, Yaghi OM. Multivariate Metal-Organic Framework-5 with 36 Different Linkers. *Inorg Chem* 2025; 64: 5561-5567.
 28. Castillo-Blas C, de la Peña-O'Shea VA, Puente-Orench I, de Paz JR, Sáez-Puche R, Gutiérrez-Puebla E, Gándara F, Monge Á. Addressed realization of multication complex arrangements in metal-organic frameworks. *Sci Adv* 2017; 3: e1700773.
 29. Castillo-Blas C, López-Salas N, Gutiérrez MC, Puente-Orench I, Gutiérrez-Puebla E, Ferrer ML, Monge MÁ, Gándara F. Encoding Metal-Cation Arrangements in Metal-Organic Frameworks for Programming the Composition of Electrocatalytically Active Multimetal Oxides. *J Am Chem Soc* 2019; 141: 1766-1774.
 30. Cavka JH, Jakobsen S, Olsbye U, Guillou N, Lamberti C, Bordiga S, Lillerud KP. A New Zirconium Inorganic Building Brick Forming Metal Organic Frameworks with Exceptional Stability. *J Am Chem Soc* 2008; 130: 13850-13851.
 31. Rosi NL, Kim J, Eddaoudi M, Chen B, O'Keeffe M, Yaghi OM. Rod Packings and Metal-Organic Frameworks Constructed from Rod-Shaped Secondary Building Units. *J Am Chem Soc* 2005; 127: 1504-1518.
 32. Moosavi SM, Nandy A, Jablonka KM, Ongari D, Janet JP, Boyd PG, Lee Y, Smit B, Kulik HJ. Understanding the diversity of the metal-organic framework ecosystem. *Nat Commun* 2020; 11: 4068.
 33. Jia T, Gu Y, Li F. Progress and potential of metal-organic frameworks (MOFs) for gas storage and separation: A review. *J Environ Chem Eng* 2022; 10: 108300.



34. Pal TK, De D, Bharadwaj PK. Metal-organic frameworks as heterogeneous catalysts for the chemical conversion of carbon dioxide. *Fuel* 2022; 320: 123904.
35. Jiao L, Seow JYR, Skinner WS, Wang ZU, Jiang HL. Metal-organic frameworks: Structures and functional applications. *Mater Today* 2019; 27: 43-68.
36. Farha OK, Eryazici I, Jeong NC, Hauser BG, Wilmer CE, Sarjeant AA, Snurr RQ, Nguyen ST, Yazaydin AÖ, Hupp JT. Metal-Organic Framework Materials with Ultrahigh Surface Areas: Is the Sky the Limit? *J Am Chem Soc* 2012; 134: 15016-15021.
37. Jiang J, Gándara F, Zhang YB, Na K, Yaghi OM, Klempner WG. Superacidity in Sulfated Metal-Organic Framework-808. *J Am Chem Soc* 2014; 136: 12844-12847.
38. He W, Lv D, Guan Y, Yu S. Post-synthesis modification of metal-organic frameworks: synthesis, characteristics, and applications. *J Mater Chem A* 2023; 11: 24519-24550.
39. Castillo-Blas C, Romero-Muñiz I, Mavrandonakis A, Simonelli L, Platero-Prats AE. Unravelling the local structure of catalytic Fe-oxo clusters stabilized on the MOF-808 metal organic-framework. *Chem Commun* 2020; 56: 15615-15618.
40. Wei R, Zhao T, Xu H, Gao J. Recent advances and challenges of metal-organic frameworks for CO₂ capture. *Dalton Trans* 2025; 54: 8385-8391.
41. Qiao L, Lu C, Fan W, Xue Z, Wang X, Kang Z, Sun D. Metal-organic framework for hydrogen storage: Advances and challenges brought by the new technologies. *Int J Hydrogen Energy* 2024; 93: 805-821.
42. Ursueguía D, Díaz E, Ordóñez S. Metal-Organic Frameworks (MOFs) as methane adsorbents: From storage to diluted coal mining streams concentration. *Sci Total Environ* 2021; 790: 148211.
43. Nguyen HL, Darù A, Chheda S, Alawadhi AH, Neumann SE, Wang L, Bai X, Alawad MO, Borgs C, Chayes JT, Sauer J, Gagliardi L, Yaghi OM. Pinpointing the Onset of Water Harvesting in Reticular Frameworks from Structure. *ACS Cent Sci* 2025; 11: 665-671.
44. Shi L, Kirlikovali KO, Chen Z, Farha OK. Metal-organic frameworks for water vapor adsorption. *Chem* 2024; 10: 484-503.
45. Yang J, Gao M, Zhang M, Zhang Y, Gao M, Wang Z, Xu L, Wang X, Shen B. Advances in the adsorption and degradation of chemical warfare agents and simulants by Metal-organic frameworks. *Coord Chem Rev* 2023; 493: 215289.
46. Wang YM, Lin JT, Ning GH, Li D. Recent advances in metal-organic frameworks for catalysing organic transformation. *Chem Commun* 2025; 61: 7563-7572.
47. Bavykina A, Kolobov N, Khan IS, Bau JA, Ramirez A, Gascon J. Metal-Organic Frameworks in Heterogeneous Catalysis: Recent Progress, New Trends, and Future Perspectives. *Chem Rev* 2020; 120: 8468-8535.
48. Abánades Lázaro I, Chen X, Ding M, Eskandari A, Fairen-Jimenez D, Giménez-Marqués M, Gref R, Lin W, Luo T, Forgan RS. Metal-organic frameworks for biological applications. *Nat Rev Methods Primers* 2024; 4: 42.
49. Rojas S, Horcajada P. Metal-Organic Frameworks for the Removal of Emerging Organic Contaminants in Water. *Chem Rev* 2020; 120: 8378-8415.
50. Aziz KHH, Mustafa FS, Hama S. Pharmaceutical removal from aquatic environments using multifunctional metal-organic frameworks (MOFs) materials for adsorption and degradation processes: a review. *Coord Chem Rev* 2025; 542: 216875.
51. Ianes J, Piraldi S, Cantoni B, Antonelli M. Micropollutants removal, residual risk, and costs for quaternary treatments in the framework of the Urban Wastewater Treatment Directive. *Water Res X* 2025; 29: 100334.
52. Svensson Grape E, Chacón-García AJ, Rojas S, Pérez Y, Jaworski A, Nero M, Åhlén M, Martínez-Ahumada E, Galetsa Feindt AE, Pepillo M, Narongin-Fujikawa M, Ibarra IA, Cheung O, Baresel C, Willhammar T, Horcajada P, Inge AK. Removal of pharmaceutical pollutants from effluent by a plant-based metal-organic framework. *Nat Water* 2023; 1: 433-442.
53. Chacón-García AJ, Rojas S, Grape ES, Salles F, Willhammar T, Inge AK, Pérez Y, Horcajada P. SU-101 for the removal of pharmaceutical active compounds by the combination of adsorption/photocatalytic processes. *Sci Rep* 2024; 14: 7882.



54. Horcajada P, Serre C, Maurin G, Ramsahye NA, Balas F, Vallet-Regí M, Sebban M, Taulelle F, Férey G. Flexible Porous Metal-Organic Frameworks for a Controlled Drug Delivery. *J Am Chem Soc* 2008; 130: 6774-6780.
55. Rojas S, Devic T, Horcajada P. Metal organic frameworks based on bioactive components. *J Mater Chem B* 2017; 5: 2560-2573.
56. Rojas S, Arenas-Vivo A, Horcajada P. Metal-organic frameworks: A novel platform for combined advanced therapies. *Coord Chem Rev* 2019; 388: 202-226.
57. Abánades Lázaro I, Wells CJR, Forgan RS. Multivariate Modulation of the Zr MOF UiO-66 for Defect-Controlled Combination Anticancer Drug Delivery. *Angew Chem* 2020; 132: 5249-5255.
58. Zhu M, Ke M, Zhao W, Wu Q, Li S, Li H, Xia F. Application of Metal-Organic Frameworks in Imaging-Guided Therapy. *Analysis & Sensing* 2024; 4: e202300052.
59. Picchi DF, Biglione C, Horcajada P. Nanocomposites Based on Magnetic Nanoparticles and Metal-Organic Frameworks for Therapy, Diagnosis, and Theragnostics. *ACS Nanosci Au* 2024; 4: 85-114.
60. Gao W, Han X, Li L, Xu Y, Gao Z, Wang C. Design of composite strategies for metal-organic frameworks in bacterial detection and antibacterial therapy: a review. *J Mater Chem B* 2025; 13: 13221-13244.
61. Luo T, Fan Y, Mao J, Yuan E, You E, Xu Z, Lin W. Dimensional Reduction Enhances Photodynamic Therapy of Metal-Organic Nanophotosensitizers. *J Am Chem Soc* 2022; 144: 5241-5246.
62. Luo T, Nash GT, Xu Z, Jiang X, Liu J, Lin W. Nanoscale Metal-Organic Framework Confines Zinc-Phthalocyanine Photosensitizers for Enhanced Photodynamic Therapy. *J Am Chem Soc* 2021; 143: 13519-13524.
63. Xin C, Li Z, Hao L, Li Y. A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook. *Mater Des* 2023; 227: 111736.
64. Mohanty B, Kumari S, Yadav P, Kanoo P, Chakraborty A. Metal-organic frameworks (MOFs) and MOF composites based biosensors. *Coord Chem Rev* 2024; 519: 216102.

Si desea citar nuestro artículo:
MOFs y el Nobel de Química 2025: estructura y aplicaciones farmacéuticas

Celia Castillo-Blas, Felipe Gándara

An Real Acad Farm (Internet).

An. Real Acad. Farm. Vol. 92. nº 1 (2026) · pp. 95-109
DOI: <http://dx.doi.org/10.53519/analesranf.2026.92.01.06>

