

Materiales porosos partiendo de bloques de construcción: Del modelo a la solución de problemas mundiales

Porous materials built from building blocks: from the model to the solution of global problems

Alfonso R. García Márquez¹ y Estela Mayoral Villa²

Resumen

Los andamiajes metal orgánicos como producto de el ensamblaje de bloques de construcción, son un ejemplo de la Química aplicada a resolver problemas globales. Aquí trataremos su historia, su definición y algunas de las aplicaciones para resolver problemas de calentamiento global, salud y escasez de agua. Esfuerzos que fueron compensados con el premio Nobel de Química.

Palabras clave: Química Inorgánica, Premio Nobel, historia de la Química, Metal-Organic Frameworks, compuestos porosos, Química de coordinación.

Abstract

Metal-organic frameworks, constructed from building blocks, exemplify the application of chemistry to solving global problems. Here, we will explore their history, definition, and some of their applications in addressing issues such as global warming, health, and water scarcity—efforts that were recognized with the Nobel Prize in Chemistry.

Keywords : Inorganic Chemistry, Nobel Prize, history of Chemistry, Metal-Organic Frameworks, porous compounds, coordination Chemistry.

CÓMO CITAR:

García Márquez, A. R. (2026, enero-marzo). Materiales porosos partiendo de bloques de construcción: Del modelo a la solución de problemas mundiales. *Educación Química*, 37(1). <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2026.1.94918>

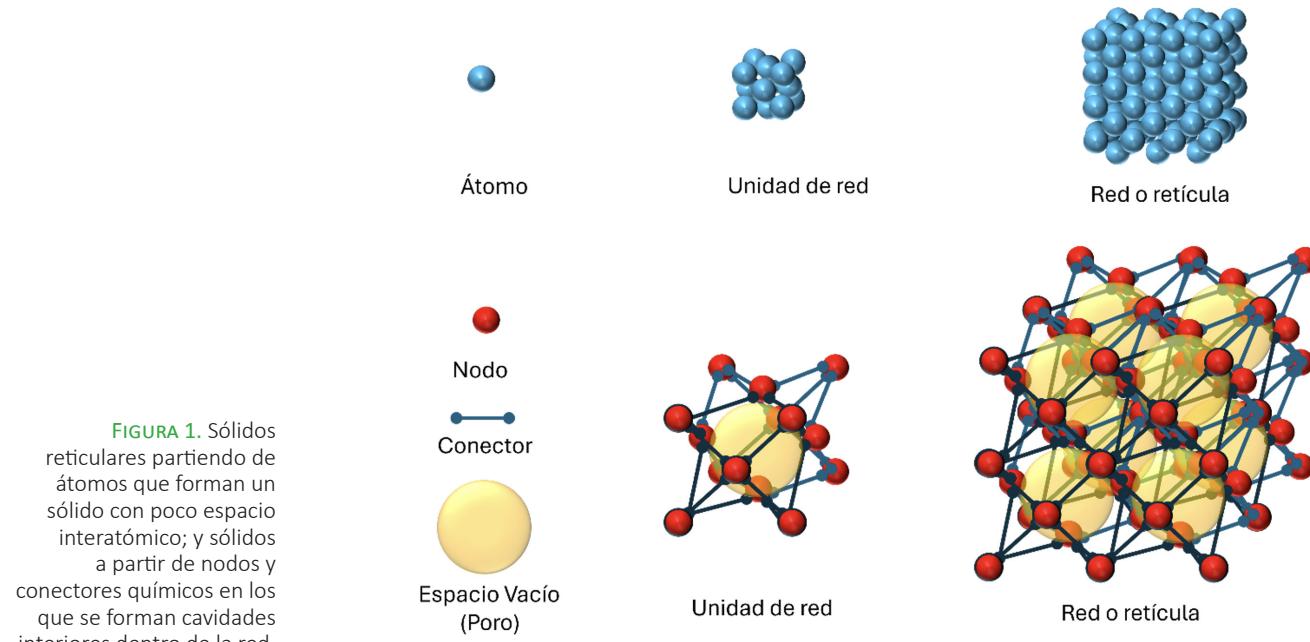
¹ Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México.

Este año, el premio Nobel de Química se otorgó a la arquitectura molecular y los bloques de construcción para formar andamiajes macroscópicos que asemejen a las esponjas.

El diseño inicial parte del modelo de sólidos inorgánicos formados por esferas (que representan átomos). Al unirse entre ellos forman una red o retícula idealmente infinita en la que están ordenados. Dichas estructuras son “compactas” que significa que no presentan ninguna cavidad importante para que haya moléculas que se introduzcan entre los espacios.

Por otra parte, para formar estos andamiajes, es necesario imaginar un modelo básico que utilizamos para armar estructuras en el que tenemos dos tipos de “piezas químicas”: los nodos, que son generalmente iones o agregados de elementos metálicos; y los conectores, que son moléculas orgánicas con dos o más grupos reactivos que formen enlaces químicos con los nodos. La conectividad depende de la disposición geométrica de los grupos enlazantes y de la geometría conectiva de los nodos. Al no tener un sistema químico de “esferas”, la unión química entre los nodos y los grupos enlazantes de los conectores genera espacios vacíos a lo largo de la red conocidos como poros. Estos últimos, son el atributo más importante de los andamiajes metal-orgánico, que han permitido aplicarlos para resolver problemas de contaminación ambiental, salud y escasez de agua, entre otros. En la figura 1, se ilustran un sólido reticular a base de átomos y otro a base de nodos y conectores, mostrando el espacio que se genera al formarse la red en este último. Cabe resaltar que la misma geometría de los nodos y conectores en estos andamiajes también es ordenada a lo largo de una red o retícula idealmente infinita.



Al tener ciertas geometrías y ángulos, podemos ensamblarlos químicamente para generar estructuras que asemejen a andamiajes, esto es como los cimientos y vigas de una construcción que tendrán cierta geometría y en este caso específico, cavidades o canales con tamaño y geometría definidas. Algunos ejemplos de geometrías de ensamblaje se ilustran en la figura 2.

Inicialmente, Richard Robson, generó un conjunto de materiales didácticos a partir de bastones y esferas de madera a las que les hacía perforaciones separadas a ciertos ángulos, para explicarles a sus alumnos que con esas geometrías de enlace se podían obtener redes infinitas con simetrías espaciales como el diamante o los sólidos inorgánicos por medio de enlaces de coordinación (Robson, 2000). Algunos de sus colegas discrepan de su idea y le decían que eso era solamente una gran pieza de basura sin sentido científico, ni práctico. Robson siguió fiel a su idea, convencido que seguro funcionaría hasta recibir el galardón. Es posible que al inicio no se imaginaba la cantidad de problemas que las estructuras que alguna vez diseñó resolverían.

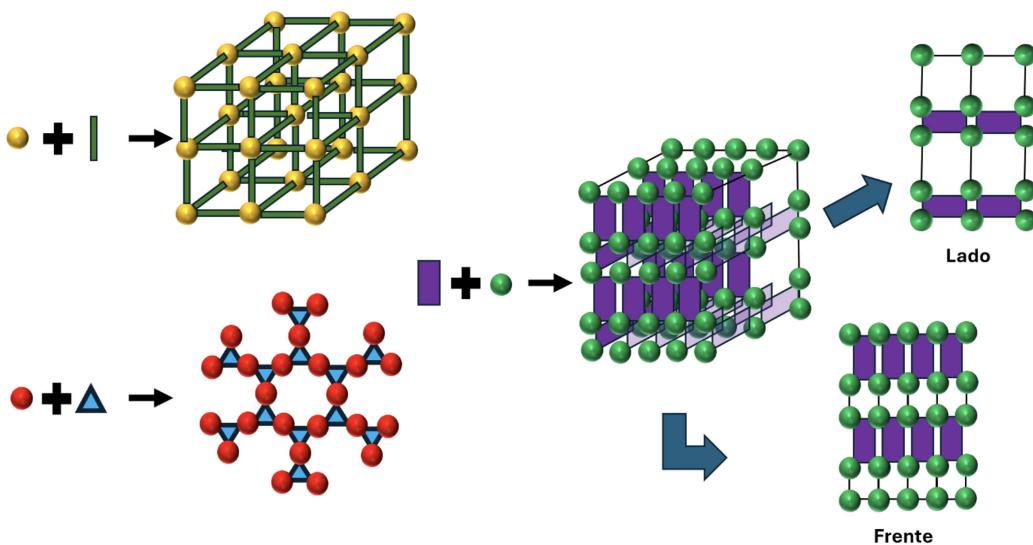


FIGURA 2. Esquema de nodos (esferas) y conectores (polígonos). En este caso, cada vértice de los polígonos representa un grupo funcional que formará un enlace químico con los nodos.

Con estos modelos planteados era posible jugar con la conectividad de los nodos y con las dimensiones de los conectores, donde la geometría estaba dictada por el ángulo de los orificios del nodo y por el tamaño y la geometría de los conectores.

Las síntesis basadas en el principio anterior requerían moléculas orgánicas con bases de Lewis (*e.g.* $(COO)_nM$ o $N-M$) y metales. Estas sólo dieron algunos casos de éxito, y generalmente eran muy difíciles de estudiar por no ser cristalinas que confirmaran la propuesta de Robson.

Durante esos años un joven Químico llamado Omar Yaghi, sintetizó una estructura como las que propuso Robson con la que decidió hacer algo radical: Evacuar todo el contenido de los poros para poder estudiarla mejor. (Yaghi et al., 1995) El resultado: Observó que el espacio de los poros de esta estructura era mayor al de productos comerciales a base de dióxido de silicio (Zeolitas). Yaghi había demostrado la existencia de poros en este tipo de sólidos por primera vez y decidió estudiar qué y cuánto de éste podían contenerse en su estructura. Al ver su sistema como un andamiaje de construcción y estar constituido por metales y moléculas orgánicas, los llamó Metal-Organic Frameworks (MOFs).

De manera casi paralela, Susumu Kitagawa en Kyoto, trabajó con un sistema similar observando la capacidad de absorción de gases al vaciar los poros de otro material similar al de Yaghi, (Kondo et al., 1997) cambiando a partir de entonces el estudio de Sólidos y materiales inorgánicos por la absorción y captura de gases de estas estructuras porosas.

La carrera por la producción de estos materiales prometedores hacía que la mejor manera para guardar los detalles estructurales de sus compuestos era trabajar con las iniciales del centro de investigación o universidad. Es por ello que las siglas NOTT, MIL, HKUST, UiO, NU y DUT corresponden respectivamente a materiales sintetizados en la Universidad de Nottingham (Reino Unido), el Instituto Lavoisier (Francia), Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong-Kong, la Universidad de Northwestern (EEUU) y la Universidad Tecnológica de Dresden (Alemania).

La definición, su clasificación y la competencia por la mayor capacidad

Al ver estas características de absorción de gases, en especial el CO₂ y su inherente capacidad en función de la geometría de los bloques de construcción, muchos grupos científicos se enfocaron en el diseño de los conectores. Al aumentar el tamaño sin alterar la geometría de conexión, la estructura y forma de los poros de la red original se conservaba pero el tamaño de los poros aumentaba y por lo tanto su capacidad de adsorción teórica, creando así estructuras isoreticulares (Furukawa et al., 2010) la explicación gráfica se ilustra en la figura 3. Para mejorar la estabilidad de los MOFs frente a los óxidos metálicos (que eran el producto no deseado de reacción), se enfocaron en la química de los conectores y nodos para que el enlace químico entre ellos fuera lo más fuerte posible. Los más estables a la oxidación e hidrólisis fueron a base de zirconio tetravalente como el del UiO-66, a base de un oligómero de zirconio y ácido tereftálico. En cuanto a capacidad a mayor superficie específica, mayor cantidad de gas adsorbido. Muchos grupos, como el de Versalles, llegó a proponer estructuras que podían estimar 5900 m₂/g. Otros sistemas, reportaban una capacidad teórica de 10000 m₂/g eran andamiajes que tenían tanto espacio, que un andamiaje del mismo material, o incluso dos, crecían en el interior de los poros. Aun así, estos últimos fueron de sumo interés para capturar el dióxido de carbono.

En cuanto a capacidad de absorción de CO₂, las mayores capacidades que se lograron fueron de 352 a 500 mg por gramo de MOF o de entre 35 y 52.8 % en masa, por lo que durante la década de los años 2000 fueron muy prometedores para resolver el problema del calentamiento global. Además del CO₂, el gas de síntesis (acetileno e hidrógeno), el metano, el monóxido de nitrógeno, el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre fueron otros gases que se almacenaron en MOFs adaptando a sus propiedades químicas en los que la química del conector y del nodo a base de cationes metálicos fueron clave para lograrlo.

Al tener una estructura tan compleja la IUPAC, trabajó en la definición y clasificación para estos materiales que, a diferencia de las moléculas, eran esqueletos infinitos de uniones químicas dirigidas, por lo que tenían que buscar un “monómero” de partida. La cristalinidad fue considerada pero no se volvió condición.

Durante el proceso se definieron las siguientes sustancias:

- 1) polímeros de coordinación: cadenas entre conectores y nodos inorgánicos.
- 2) Redes de coordinación: redes infinitas 2D y 3D entre metales o agregados de cationes inorgánicos y los conectores.
- 3) Redes de coordinación porosas, que básicamente eran lo mismo, pero se diferenciaban por tener cavidades porosas en su estructura.

Finalmente se llegó a que un MOF tiene que ser un sólido, reticular y que presente porosidad “potencial” o permanente. (Batten et al., 2013).

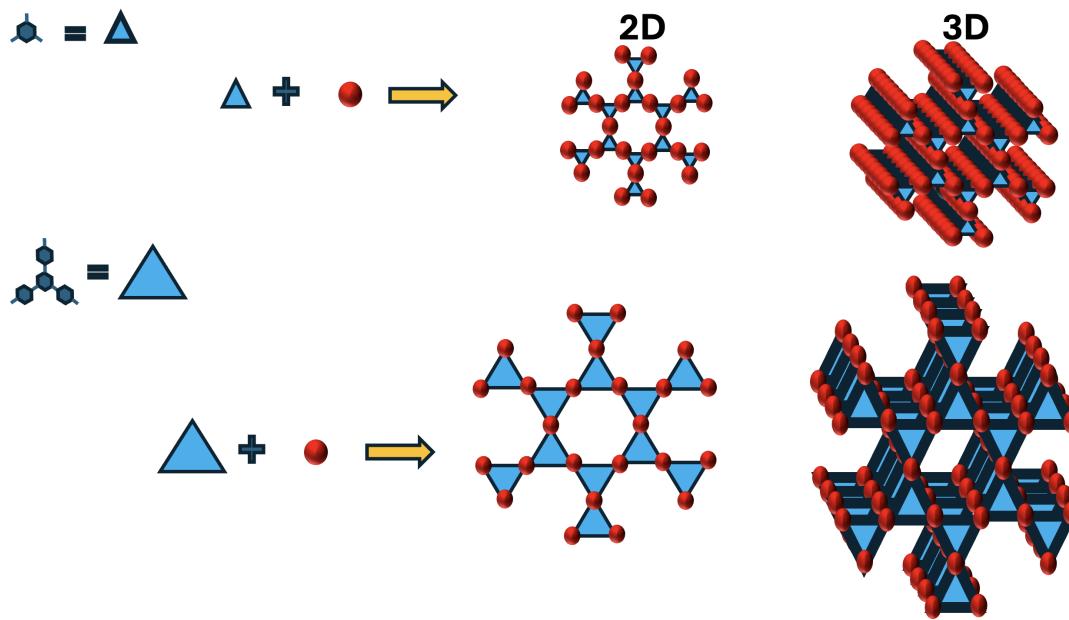


FIGURA 3: Al modificar el tamaño del conector sin alterar su geometría, es posible formar un andamiaje metal-orgánico que posea la misma forma o reticularidad, pero que posea un tamaño de poro mucho mayor al del conector original. Esta familia de andamiajes se les conoce como estructuras isoreticulares.

¿A qué nos referimos como porosidad potencial?

Hay algunos MOFs que cambian de forma (Schneemann et al., 2014), y al hacerlo abren poros o canales simplemente por un giro de ejes atómicos de los conectores o entre los nodos. Generalmente, las cadenas de nodos interconectadas a cadenas adyacentes mediante los conectores. Para visualizar esto, tenemos que pensar en dos ejemplos: Los racks para botellas o las esferas de juguete que se expanden. Cuando tenemos un punto de giro, que en el caso de los andamiajes metal orgánicos son átomos de oxígeno que interconectan los cationes metálicos y hacen que los conectores se muevan o roten ocasionando que los poros se abran o se cierren en función de esta acción (Figura 4).

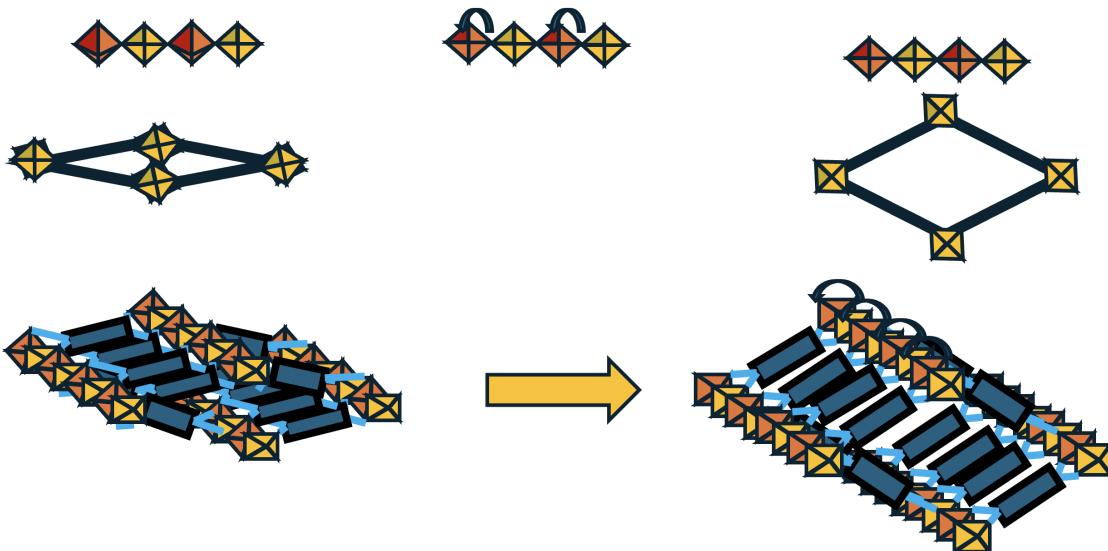


FIGURA 4. Los andamiajes flexibles son aquellos que tienen "pivotes" atómicos que permiten que la estructura cambie por medio de rotaciones. Estos pivotes pueden encontrarse entre los nodos (metales o parte inorgánica) que forman una cadena que permiten el giro y abrir la estructura para formar el poro.

Métodos de Síntesis

Para obtener estos materiales, se parte de sales inorgánicas como nitratos, cloruros o percloratos del metal a utilizar y el compuesto orgánico correspondiente. Sin embargo, la mayoría de los métodos requieren disolvente y algunos aditivos que permitan obtener el compuesto de manera más cristalina.

Hay dos tipos de procesos:

- 1) en lote, que consiste en preparar todo dentro de un reactor y al terminar se obtiene el producto.
- 2) en continuo o que una vez iniciado el proceso de obtención teóricamente se seguirá obteniendo producto hasta que se deje de alimentar el sistema.

Los principales métodos en lote son la síntesis solvotermal o solvotérmica, síntesis coloidal, molienda, síntesis con ultrasonido y electroquímica. Mientras que los métodos en continuo más usados son la síntesis por secado por aspersión (Carné-Sánchez et al., 2013) y la síntesis por microfluídica (Ge et al., 2024).

La producción industrial y algunos criterios para su síntesis sustentable como retos para su aplicación

Para poder evaluar la viabilidad de su obtención a nivel industrial, uno de los valores que se utiliza para esta meta es el rendimiento espacio-tiempo (STY por sus siglas en inglés), que nos indica cuántos kilogramos de producto se obtienen por volumen de reactor por unidad de tiempo. Para síntesis en lote el récord lo ostenta el MOF ZIF-8 con un valor de 210,000 kg m⁻³ dia⁻¹ sintetizado en laboratorio. Sin embargo, el mayor rendimiento espacio-tiempo a nivel industrial lo ostenta la Basolita® A520 con un valor de 3,000 kg m⁻³ dia⁻¹.

Actualmente existen compañías que ya producen estos materiales a nivel industrial, como BASF®, Framergy en Estados Unidos de Norteamérica; las compañías Nuada y Promethean Particles en Reino Unido, así como MOFapps y novoMOF situadas en Noruega y en Suiza, respectivamente.

Para evaluar qué tan sustentable o verde es una síntesis de estos materiales, se deben considerar los siguientes factores de acuerdo con el grupo del Instituto de Materiales Porosos de París (Chakraborty et al., 2024):

1. *La fuente del bloque inorgánico o metal:* para elegir el metal con el que se diseñará el MOF, es importante analizar su disponibilidad, su costo y su toxicidad. Tradicionalmente, las síntesis en el laboratorio se realizaban utilizando percloratos, nitratos y cloruros del metal, que, a pesar de su gran solubilidad en agua, reactividad y capacidad de formar compuestos cristalinos, los percloratos y nitratos son altamente inestables al calentar y son oxidantes, por lo que representan un riesgo de explosión potencial en el reactor. Los cloruros son corrosivos por ende la adquisición de un reactor especial elevaría considerablemente el costo de producción.

Como sales alternativas a los anteriores, se ha propuesto utilizar alternativas más seguras como acetatos, carbonatos, óxidos y sulfatos, en detrimento de su solubilidad en agua con respecto a nitratos, cloruros y percloratos, así como la susceptibilidad de formar coproductos, bajando el rendimiento de la reacción.

En cuanto a toxicidad, existen numerosos estudios en áreas de la salud. Sin embargo, los estudios de impacto ambiental son reducidos aún, por lo que es indispensable investigar enfocándose en la liberación de iones metálicos como desecho de producción. En este aspecto se considera que los metales que son más seguros ambos aspectos anteriores son Aluminio, Calcio, Hierro, Magnesio, Zinc y Zirconio.

Resumiendo, la elección del metal influirá directamente en la seguridad, toxicidad, manejo y costos de producción y para industrializarlos responsablemente y los esfuerzos deben enfocarse evaluar su impacto ambiental, su ciclo de vida útil y su disposición segura.

2. *El precursor orgánico:* El costo de producción de los andamiajes metal-orgánicos es inherente al ligante orgánico que es generalmente el de mayor costo del proceso. Desde las primeras etapas de síntesis es recomendable utilizar compuestos económicos, no tóxicos y disponibles de manera comercial. Algunos ejemplos que cumplen con los criterios anteriores y han sido utilizados para su síntesis son los ácidos fumárico, tereftálico, isoftálico, y trimésico.

El segundo paso a la sustentabilidad es obtener el ligante a partir de un proceso de reciclaje. Como ejemplo tenemos al ácido tereftálico, que puede obtenerse a partir de la descomposición de un polímero que representa riesgo a la salud: el Politereftalato de etileno o PET, generando ácido tereftálico para síntesis de MOFs como el UiO-66(Zr), HKUST-1(Cu), MIL-101, MIL-53 y MIL-88 y etilenglicol, que puede aprovecharse en otros procesos industriales.

Adicionalmente, Los ácidos **bio-sostenibles** como los ácidos fumárico, gálico, L-aspártico, mucónico y 2,5-furfurildicarboxílico (Figura 5) son una alternativa muy atractiva para obtener andamiajes metal-orgánicos como el MIL-88A(Fe), el fumarato de zirconio y el MIP-211, sin embargo, la elaboración a partir de estos compuestos todavía no es competitiva en cuanto a precio.

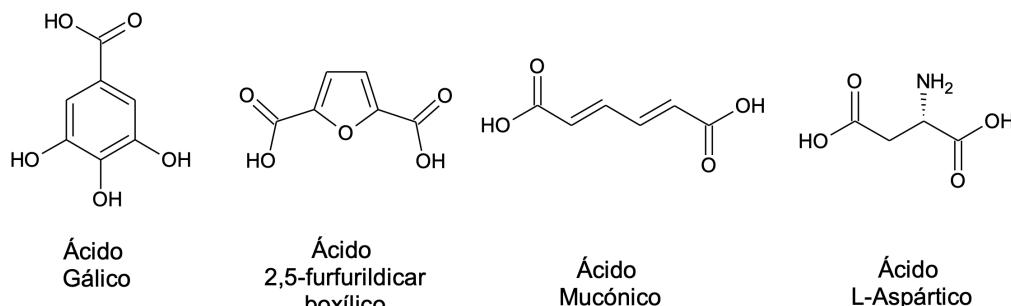


FIGURA 5. Ácidos orgánicos empleados para las síntesis de MOFs

3. *Disolvente de síntesis:* Además de los factores antes mencionados, es importante que el disolvente cumpla con las siguientes condiciones:

- Tener un punto de ebullición lo más bajo posible para reducir el consumo de energía del proceso
- Solubilizar los reactivos y la cristalización del producto final.

Las primeras síntesis de MOFs fueron en amidas a pesar su toxicidad, su flamabilidad y su riesgo ambiental dificultando su viabilidad a nivel industrial.

La alternativa más verde es agua, que ha permitido obtener el fumarato de aluminio con un alto rendimiento espacio tiempo, así como MIL-100, MIL-88, MIL-127 y CAU-10 exitosamente.

4. *El método de calentamiento y el tipo de síntesis:* Si se utiliza microondas en lugar de otra fuente de calentamiento, el tiempo de preparación puede reducirse de semanas a minutos. Sin embargo, su escalamiento a nivel industrial representa un reto ya que se obtienen generalmente tamaños de partícula muy pequeños que dificultan sus procesos de lavado y formado, además de ser incompatible para procesos continuos que requieran un tiempo de calentamiento elevado.
5. *Las condiciones de síntesis:* Las condiciones de preparación deben ser óptimas para evitar la formación de óxidos e hidróxidos como producto principal. La adición de cualquier aditivo que permita llegar a ellas será limitante de un bajo costo.
6. *Los lavados y activación de los poros:* Antes de poder aprovechar los poros es necesario evacuar lo que no reaccionó mediante lavados con disolventes. Esto es independiente de utilizar o no disolvente para su síntesis. El no eliminar el contenido de los poros, conlleva a una pérdida de sus propiedades de absorción y su capacidad de almacenamiento. Los cationes metálicos son eliminados de manera sencilla con agua, mientras que el ligante residual, requiere alguna alternativa a las amidas, que, a pesar de su elevada solubilización de ácidos orgánicos, son incompatibles con un proceso verde. Como sustitutos se han empleado sulfolano y alcohol bencílico, pero su remoción de los poros es energéticamente costosa. La calcinación es una alternativa, pero este procedimiento representa un riesgo de degradación del MOF.

Los lavados con dióxido de carbono supercrítico ha sido una alternativa al uso de disolventes. En este estado el CO₂ abate su tensión superficial se abate totalmente, solubilizando los residuos de síntesis para extraerlos. Este procedimiento ha permitido obtener las mayores capacidades de almacenamiento para estos materiales. Sin embargo, su mayor limitante para emplearlo industrialmente es su alto costo de instalación y mantenimiento.

Aplicaciones en Biomedicina

Durante los años 2000, algunos grupos de investigación en biomedicina se enfocaron en elaborar sistemas de liberación controlada de fármacos basados en sistemas como liposomas, nanopartículas, fullerenos y nanotubos de carbono por ser componentes cuyas dimensiones y composición permitían tener una gran superficie de contacto y poder agregar una cantidad importante de moléculas activas, así como atravesar la membrana celular su tamaño era menor a los 100 nm.

Por otra parte, en caso del tratamiento del cáncer y el VIH, muchos de los medicamentos utilizados eran muy poco solubles en agua, lo que dificultaba el tratamiento, otros eran muy inestables y al entrar en el organismo se descomponían antes de llegar al sitio donde actuaban.

Los materiales porosos eran una alternativa muy atractiva para asistir a este tipo de moléculas ya que, dentro de los poros, éstas no sufrirían descomposición. Si se preparaban a escalas nanométricas, se esperaba que los nanoMOFs atravesaran la membrana celular.

Adicionalmente, si el tratamiento requería liberación de cierta cantidad durante un tiempo largo, su uso ofrecía tener sistemas de liberación controlada de fármacos.

Dada su gran capacidad y las propiedades químicas y físicas de sus poros, se buscó dentro de estos sistemas aquellos que cumplieran con una baja toxicidad, una gran capacidad de encapsulamiento, que pudieran atravesar todas las barreras inmunológicas para llegar al sitio de liberación, que fueran estables hasta que el medicamento llegara al sitio a tratar y su degradación fuera lo menos tóxica posible y que se eliminara del organismo.

Los primeros trabajos reportaron una mayor capacidad de carga frente a otros materiales porosos y sus perfiles de degradación correspondían a una liberación controlada. Posteriormente, el uso de materiales que contenían moléculas poco tóxicas y hierro, fueron ideales para la encapsulación y liberación de fármacos insolubles en agua como el Busulfán, un fármaco que en esos años se utilizaba como tratamiento para algunos tipos agresivos de cáncer de leucemia y médula ósea.

Además de trabajar con la geometría y capacidad de estos materiales, era necesario que no fueran “detenidos” por la barrera inmunológica o que simplemente se acumularan por no poderse dispersar en los fluidos corporales. Para resolver esto, también se trabajó recubriendo a estos nanoacarreadores (MOF+medicamentos) (Horcajada et al., 2010) con polímeros que les confirieran una cobertura que evitara su detención por el sistema inmune.

Otros sistemas utilizaron los poros de estos andamiajes para cargarlos con dos componentes: Gadolinio (agente de contraste en resonancia de imagen) y un agente antineoplásico, de tal manera que el MOF se utilizaría como un agente doble de diagnóstico y de tratamiento. Esta combinación de terapia y diagnóstico en un mismo medicamento se conoce como teragnóstico.

La siguiente generación de estos materiales ya no se quedaba como un encapsulador. Aparecieron varios de estos bioMOFs cuyas estructuras consistían en metales no tóxicos para el cuerpo humano como magnesio, zinc y hierro y moléculas endógenas. (Imaz et al., 2011; McKinlay et al., 2010)

La complejidad de los sistemas de tratamiento incrementó en los últimos años, permitiendo la inmovilización de moléculas más grandes como enzimas (Patra et al., 2016) o encapsulado de nanopartículas para aplicaciones biomédicas (Rananaware et al., 2025).

Los MOFs como una solución a la escasez de agua en zonas áridas

Dada su gran capacidad y la cantidad de grupos que son afines al agua dentro de los poros, estos materiales hacían posible extraer agua directamente del aire para resolver la demanda de agua en zonas desérticas.

A pesar de la baja humedad relativa del aire en estos lugares los MOFs demostraron una capacidad excepcional para capturar vapor de agua incluso con un porcentaje de humedad por debajo del 20%.

El mecanismo por el que estos MOFs absorben agua es el siguiente: El aire junto con el agua que contiene se difunde dentro del MOF. El interior de sus poros tiene varias especies químicas que contienen hidrógeno, oxígeno o metales que son muy afines al agua que interactúan con ésta formando redes conformadas con moléculas de agua que van creciendo gradualmente formando capas hasta llenar los poros. El agua se puede desorber de manera controlada para aprovecharla posteriormente (Figura 6).

Su diseño debe considerar que absorba el agua gradualmente y llegue a su máximo a presiones altas, que sus poros sean de tamaños entre 2 y 50 nanómetros o bien que tenga varios tamaños de poros, que las interacciones entre el MOF y el agua no sean muy fuertes para poder realizar el proceso de desorción no sea energéticamente costoso y tener una buena ciclabilidad (conservar la capacidad de absorción tras varios ciclos).

Para este fin se utilizaron principalmente MOFs de zirconio (Furukawa et al., 2014) (e.g. MOF zirconio-fumarato) con el que el grupo de Yaghi, construyó un sistema de extracción alimentado por energía solar que registró una recolección en el desierto de Arizona (humedad relativa de 20 a 30%) de 700 mL de agua por kg de MOF por día (Song et al., 2023). Este MOF es capaz de absorber agua a humedades relativas de 10 a 20 % y es térmica y químicamente estable.

El récord de adsorción de agua es del MOF-801(Zr), que registró 2.8 L de agua por kilogramo de MOF por día en condiciones óptimas.

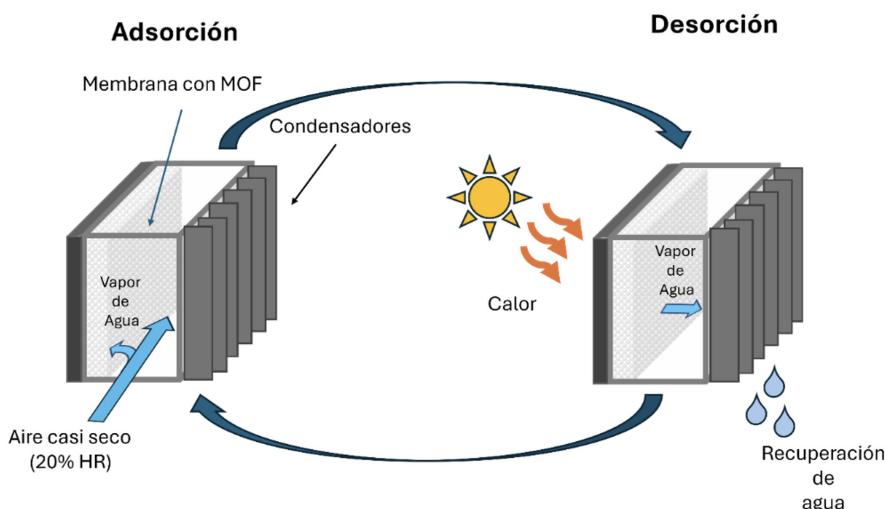


FIGURA 6. Esquema de un sistema de recolección de agua. Estos sistemas tienen tres componentes: El módulo de adsorción que contiene al MOF que entra en contacto con el aire para capturar humedad, El sistema de calentamiento para liberar el agua adsorbida y el condensador que enfriá el vapor liberado para recuperar el agua líquida.

El sistema que se probó en el desierto de Arizona, cuyo módulo de adsorción contenía al MOF-801 fue expuesto al aire durante la noche para recolectar el agua. La mañana siguiente el sol calentaba el sistema para que el agua recuperada se desorbiera en forma de vapor. Este vapor se difundía hacia el condensador que la enfriaba para volverla a su estado líquido y así poder aprovecharla. Este sistema permitió hacer la recolección récord y cabe señalar que la adsorción del MOF-801 se regeneraba completamente a temperaturas entre 45 y 60 °C.

Con base en lo anterior su capacidad de adsorber agua a baja humedad, su regeneración con energía solar y su versatilidad estructural hacen de los MOFs candidatos ideales para enfrentar la crisis hídrica global. Por lo que es probable que veamos su implementación en comunidades vulnerables en los próximos años.

Concluyendo, los MOFs y la química reticular a partir de bloques de construcción lograron motivar a la comunidad científica mundial a resolver problemas sociales de actualidad como la remediación del medio ambiente, la salud y la carencia de agua en lugares áridos. Este esfuerzo común de aquellos grupos que contribuyeron a su desarrollo logró que la trascendencia de estos materiales y en especial, la comprensión de su Naturaleza Química.

Bibliografía

- Batten, S. R., Champness, N. R., Chen, X.-M., Garcia-Martinez, J., Kitagawa, S., Öhrström, L., O'Keeffe, M., Suh, M. P., & Reedijk, J. (2013). Terminology of metal-organic frameworks and coordination polymers (IUPAC Recommendations 2013)*. *Pure and Applied Chemistry*, 85(8), 1715–1724. <https://doi.org/doi:10.1351/PAC-REC-12-11-20>
- Carné-Sánchez, A., Imaz, I., Cano-Sarabia, M., & Maspoch, D. (2013). A spray-drying strategy for synthesis of nanoscale metal-organic frameworks and their assembly into hollow superstructures. *Nature Chemistry*, 5(3), 203–211. <https://doi.org/10.1038/nchem.1569>
- Chakraborty, D., Yurdusen, A., Mouchaham, G., Nouar, F., & Serre, C. (2024). Large-Scale Production of Metal–Organic Frameworks. *Advanced Functional Materials*, 34(43), 1–23. <https://doi.org/10.1002/adfm.202309089>
- Furukawa, H., Gándara, F., Zhang, Y.-B., Jiang, J., Queen, W. L., Hudson, M. R., & Yaghi, O. M. (2014). Water Adsorption in Porous Metal–Organic Frameworks and Related Materials. *Journal of the American Chemical Society*, 136(11), 4369–4381. <https://doi.org/10.1021/ja500330a>
- Furukawa, H., Ko, N., Go, Y. B., Aratani, N., Choi, S. B., Choi, E., Yazaydin, A. Ö., Snurr, R. Q., O'Keeffe, M., Kim, J., & Yaghi, O. M. (2010). Ultrahigh porosity in metal-organic frameworks. *Science*, 329(5990), 424–428. <https://doi.org/10.1126/science.1192160>
- Ge, X., Liu, Z., Wei, N., Lin, X., & Hu, C. (2024). Microfluidic Synthesis of Defective and Hierarchical Pore Zr Metal-Organic Framework Materials and CO₂ Adsorption Performance Study. *Crystal Growth and Design*, 24(21), 9084–9096. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c01106>
- Horcajada, P., Chalati, T., Serre, C., Gillet, B., Sebrie, C., Baati, T., Eubank, J. F., Heurtaux, D., Clayette, P., Kreuz, C., Chang, J. S., Hwang, Y. K., Marsaud, V., Bories, P. N., Cynober, L., Gil, S., Férey, G., Couvreur, P., & Gref, R. (2010). Porous metal-organic-framework nanoscale carriers as a potential platform for drug delivery and imaging. *Nature Materials*, 9(2), 172–178. <https://doi.org/10.1038/nmat2608>
- Imaz, I., Rubio-Martínez, M., An, J., Solé-Font, I., Rosi, N. L., & Maspoch, D. (2011). Metal-biomolecule frameworks (MBioFs). *Chemical Communications*, 47(26), 7287–7302. <https://doi.org/10.1039/c1cc11202c>
- Kondo, M., Yoshitomi, T., Matsuzaka, H., Kitagawa, S., & Seki, K. (1997). Three-Dimensional Framework with Channeling Cavities for Small Molecules: {[M2(4, 4'-bpy)3(NO₃)₄]·xH₂O}_n (M = Co, Ni, Zn). *Angewandte Chemie International Edition in English*, 36(16), 1725–1727. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.199717251>
- McKinlay, A. C., Morris, R. E., Horcajada, P., Férey, G., Gref, R., Couvreur, P., & Serre, C. (2010). BioMOFs: Metal-organic frameworks for biological and medical applications. *Angewandte Chemie - International Edition*, 49(36), 6260–6266. <https://doi.org/10.1002/anie.201000048>

- Patra, S., Sene, S., Mousty, C., Serre, C., Chaussé, A., Legrand, L., & Steunou, N. (2016). Design of Laccase-Metal Organic Framework-Based Bioelectrodes for Biocatalytic Oxygen Reduction Reaction. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(31), 20012-20022. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b05289>
- Rananaware, P., Pandit, P., Narayan, M., & Brahmkhatri, V. (2025). Nanoparticle-encapsulated metal-organic frameworks: innovative design strategies and biomedical applications. *Nano Trends*, 11(May), 100125. <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025.100125>
- Robson, R. (2000). A net-based approach to coordination polymers. *J. Chem. Soc. Dalton Trans.*, 21, 3735-3744. <https://doi.org/10.1039/B003591M>
- Schneemann, A., Bon, V., Schwedler, I., Senkovska, I., Kaskel, S., & Fischer, R. A. (2014). Flexible metal-organic frameworks. *Chem. Soc. Rev.*, 43(16), 6062-6096. <https://doi.org/10.1039/C4CS00101J>
- Song, W., Zheng, Z., Alawadhi, A. H., & Yaghi, O. M. (2023). MOF water harvester produces water from Death Valley desert air in ambient sunlight. *Nature Water*, 1(7), 626-634. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00103-7>
- Yaghi, O. M., Li, G., & Li, H. (1995). Selective binding and removal of guests in a microporous metal-organic framework. *Nature*, 378(6558), 703-706. <https://doi.org/10.1038/378703a0>