

## *La Educación en la Química en Argentina y en el Mundo*

### EL PREMIO NOBEL DE QUÍMICA 2025

Luz Lastres

*Universidad de Buenos Aires, Argentina.*

E-mail: [klastres@gmail.com](mailto:klastres@gmail.com)

Recibido: 09/11/2025. Aceptado: 11/12/2025.

ARK CAICYT: <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s23449683/1r26xasqi>

**Resumen.** A partir de la publicación de la Real Academia de Ciencias sueca, se presenta el trabajo por el cual fue otorgado Premio Nobel de Química en 2025. En esta edición se reconocieron las investigaciones sobre el desarrollo de estructuras organometálicas porosas (MOFs) llevadas adelante por Susumu Kitagawa, Richard Robson y Omar M. Yaghi. Estas sustancias resultan muy relevantes para afrontar problemas como el cambio climático debido a su capacidad de captación de gases como el CO<sub>2</sub>, de purificación de aguas, entre otras.

**Palabras clave:** estructuras organometálicas (MOFs), estructuras porosas, remoción de contaminantes

#### The Nobel Prize in Chemistry 2025

**Abstract.** Based on the publication of the Royal Swedish Academy of Sciences, this paper presents the work for which the 2025 Nobel Prize in Chemistry was awarded. In this edition, the prize recognized research on the development of porous organometallic structures, known as metal-organic frameworks (MOFs), carried out by Susumu Kitagawa, Richard Robson, and Omar M. Yaghi. These substances are highly relevant for addressing global challenges such as climate change, due to their capacity for gas capture—particularly CO<sub>2</sub>—as well as for water purification, among other applications.

**Keywords:** metalorganic frameworks (MOFs), porous structures, pollutant extraction

#### O Prêmio Nobel de Química de 2025

**Resumo.** A partir da publicação da Real Academia Sueca de Ciências, apresenta-se o trabalho pelo qual foi concedido o Prêmio Nobel de Química de 2025. Nesta edição, foram reconhecidas as pesquisas sobre o desenvolvimento de estruturas organometálicas porosas (MOFs), conduzidas por Susumu Kitagawa, Richard Robson e Omar M. Yaghi. Essas substâncias são altamente relevantes para o enfrentamento de problemas como as mudanças climáticas, devido à sua capacidade de captura de gases como o CO<sub>2</sub>, de purificação de águas, entre outras aplicações.

**Palavras-chave:** estruturas organometálicas (MOFs), estruturas porosas, remoção de contaminantes

Información publicada por la Real Academia Sueca de Ciencias:

**Science Editors:** Peter Brzezinski, Heiner Linke, Olof Ramström and Xiaodong Zou, the Nobel Committee for Chemistry

**Text:** Ann Fernholm

**Translation:** Clare Barnes

**Illustrations:** Johan Jarnestad

**Editor:** Alicia Hegner

© The Royal Swedish Academy of Sciences



La Real Academia de Ciencias Sueca otorgó el Premio Nobel de Química 2025 a Susumu Kitagawa, Kyoto University de Japón, Richard Robson de la Universidad de Melbourne, Australia y a Omar M. Yaghi de la Universidad de California, Berkeley, Estados Unidos (Figura 1) por el desarrollo de nuevos materiales organometálicos porosos.

SUSUMU KITAGAWA



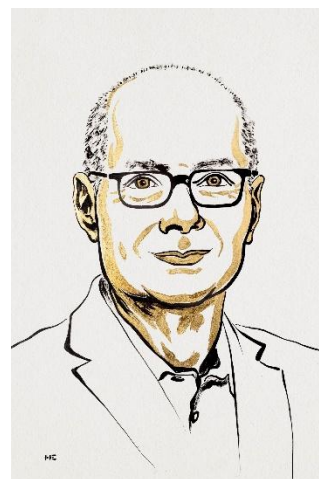
Nacido en 1951 en Kioto, Japón. Doctorado en 1979 por la Universidad de Kioto, Japón. Profesor de la Universidad de Kioto, Japón.

RICHARD ROBSON



Nacido en 1937 en Glusburn, Reino Unido. Doctorado en 1962 por la Universidad de Oxford, Reino Unido. Profesor de la Universidad de Melbourne, Australia.

OMAR M. YAGHI



Nacido en 1965 en Amán, Jordania. Doctorado en 1990 por la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, EE. UU. Profesor de la Universidad de California, Berkeley, EE. UU.

*Figura 1. Galardonados con el Premio Nobel de Química 2025. Fuente. Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/>*

## Pequeño repaso

Los compuestos organometálicos son conocidos desde el siglo XIX, principalmente por las investigaciones de Frankland. Se definen como compuestos que poseen al menos un enlace entre un átomo de carbono (orgánico) y un metal y tuvieron amplio desarrollo durante el siglo XX con los organomagnesianos de Víctor Grignard, los antidetonantes con plomo para los combustibles (tetraetilo de plomo) y variados catalizadores.

Este campo que supera los límites entre la química inorgánica y la orgánica fue reconocido con la entrega del premio Nobel de Química a Wilkinson y Fischer en 1973 por sus investigaciones sobre los compuestos organometálicos tipo "sándwich" (Chamizo, 2018, Corona-González y Rufian, 2024).

## **Nuevas arquitecturas moleculares para la química**

Susumu Kitagawa, Richard Robson y Omar M. Yaghi recibieron el Premio Nobel de Química 2025 por el desarrollo de un nuevo tipo de arquitectura molecular. Las estructuras organometálicas que crearon contienen grandes cavidades por las que las moléculas pueden fluir hacia adentro y hacia afuera. Los investigadores las han utilizado para extraer agua del aire del desierto, extraer contaminantes del agua, capturar dióxido de carbono y almacenar hidrógeno.

“Un atractivo y espacioso estudio, diseñado específicamente para tu vida como molécula de agua”: así es como un agente inmobiliario describiría una de las estructuras metalorgánicas que laboratorios de todo el mundo han desarrollado en las últimas décadas. Otras estructuras de este tipo están diseñadas específicamente para capturar dióxido de carbono, separar PFAS (sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas) del agua, administrar fármacos en el cuerpo o gestionar gases extremadamente tóxicos. Algunas pueden atrapar el gas etileno de la fruta, para que madure más lentamente, o encapsular enzimas que descomponen trazas de antibióticos en el ambiente.

En pocas palabras, estas estructuras organometálicas son excepcionalmente útiles. Susumu Kitagawa, Richard Robson y Omar Yaghi recibieron el Premio Nobel de Química 2025 por crear las primeras estructuras metalorgánicas (MOF) y demostrar su potencial. Gracias al trabajo de los galardonados, los químicos han podido diseñar decenas de miles de MOF diferentes, lo que ha facilitado nuevas maravillas químicas.

Como suele ocurrir en las ciencias, la historia del Premio Nobel de Química 2025 comienza con alguien que pensó de forma innovadora. En esta ocasión, la inspiración surgió durante los preparativos de una clase clásica de química, en la que los estudiantes debían construir moléculas a partir de barras y esferas.

### **Un simple modelo de madera de una molécula genera una idea**

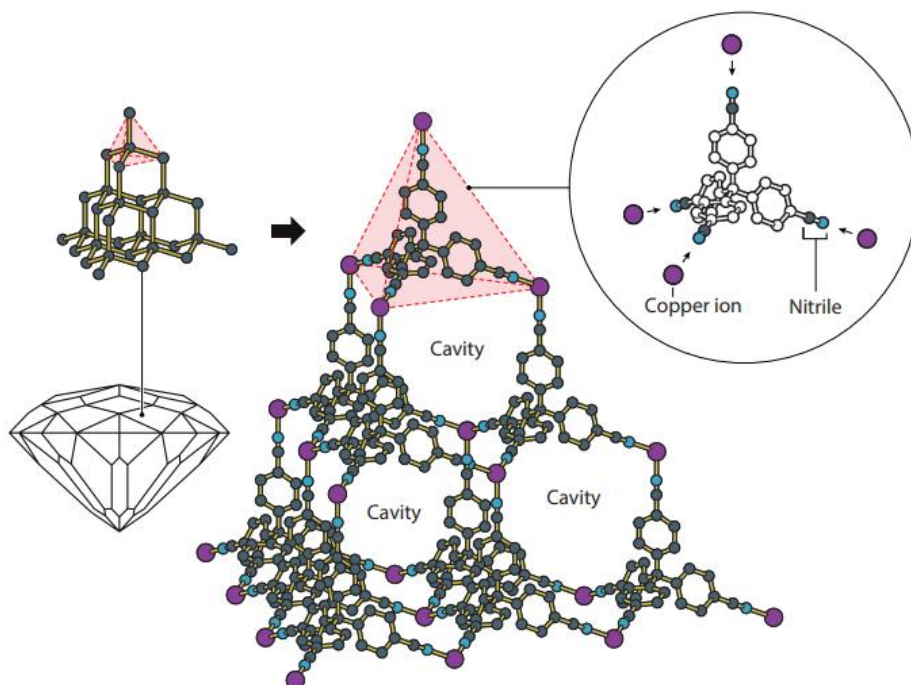
Corría el año 1974. Richard Robson, profesor de la Universidad de Melbourne (Australia), recibió el encargo de convertir bolas de madera en modelos de átomos para que los estudiantes pudieran crear estructuras moleculares. Para ello, necesitaba que el taller de la universidad les perforara agujeros para que las varillas de madera (los enlaces químicos) se unieran a los átomos. Sin embargo, los agujeros no podían colocarse al azar. Cada átomo (como el carbono, el nitrógeno o el cloro) forma enlaces químicos de una manera específica. Robson necesitaba marcar dónde debían perforarse los agujeros.

Cuando el taller le devolvió las bolas de madera, las probó para construir algunas moléculas. Fue entonces cuando tuvo una revelación: había una gran cantidad de información incorporada en la posición de los agujeros. Las moléculas modelo tenían automáticamente la forma y la estructura correctas gracias a la ubicación de los agujeros. Esta revelación lo llevó a su siguiente idea: ¿qué pasaría si utilizara las propiedades inherentes de los átomos para unir diferentes tipos de moléculas, en lugar de átomos individuales? ¿Podría diseñar nuevos tipos de construcciones moleculares?

## Robson construye innovadoras creaciones químicas

Cada año, cuando Robson sacaba las maquetas de madera para enseñar a los nuevos estudiantes, se le ocurría la misma idea. Sin embargo, pasó más de una década antes de que decidiera ponerla a prueba. Empezó con un modelo muy sencillo, inspirado en la estructura de un diamante, en el que cada átomo de carbono se une a otros cuatro, formando una diminuta pirámide.

El objetivo de Robson era construir una estructura similar, pero basada en iones de cobre con carga positiva,  $\text{Cu}^+$ . Al igual que el carbono, prefieren estar rodeados por otros cuatro átomos. Combinó los iones de cobre con una molécula de cuatro brazos: 4', 4'', 4''', 4''''-tetracianotetrafenilmetano. No hace falta recordar su complicado nombre, pero es importante que la molécula al final de cada brazo tuviera un grupo químico, el nitrilo ( $-\text{CN}$ ), que era atraído por los iones de cobre con carga positiva (Figura 2).



*Figura 2. Richard Robson se inspiró en la estructura del diamante, donde cada átomo de carbono está unido a otros cuatro en forma de pirámide. En lugar de carbono, utilizó iones de cobre y una molécula con cuatro brazos, cada uno con un nitrilo en el extremo. Este es un compuesto químico que atrae a los iones de cobre. Al combinarse, las sustancias formaron un cristal ordenado y muy espacioso. ©Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias*

En aquel entonces, la mayoría de los químicos habían asumido que la combinación de iones de cobre con las moléculas de cuatro brazos daría como resultado un caos de iones y moléculas. Pero las cosas salieron como Robson esperaba. Como él había predicho, la atracción inherente entre iones y moléculas era importante, por lo que se organizaron en una gran estructura molecular. Al igual que los átomos de carbono en un diamante, formaron una estructura cristalina regular. Sin embargo, a diferencia del diamante, que es un material compacto, este cristal contenía una abundante cantidad de grandes cavidades (Figura 2).

En 1989, Robson presentó su innovadora creación química en el *Journal of the American Chemical Society*. En su artículo, especula sobre el futuro y sugiere que esto podría ofrecer una nueva forma de construir materiales. Éstos, escribía, podrían adquirir propiedades nunca antes vistas, potencialmente beneficiosas. Resultó que había previsto el futuro.

### **Robson impulsa un espíritu pionero en la química**

Apenas un año después de la publicación de su trabajo pionero, Robson presentó varios tipos nuevos de construcciones moleculares con cavidades rellenas de diversas sustancias. Utilizó una de ellas para intercambiar iones. Sumergió la construcción llena de iones en un fluido que contenía un tipo diferente de ion. El resultado fue que los iones intercambiaron su posición, demostrando que las sustancias podían fluir dentro y fuera de la construcción.

En sus experimentos, Robson demostró que el diseño racional puede utilizarse para construir cristales con interiores espaciosos, optimizados para sustancias químicas específicas. Sugirió que esta nueva forma de construcción molecular, correctamente diseñada, podría utilizarse por ejemplo para catalizar reacciones químicas.

Sin embargo, las construcciones de Robson eran bastante precarias y tendían a desmoronarse. Muchos químicos las consideraron inútiles, pero algunos comprendieron que había dado con algo y, para ellos, sus ideas sobre el futuro despertaron un espíritu pionero. Quienes sentarían las bases de sus visiones fueron Susumu Kitagawa y Omar Yaghi. Entre 1992 y 2003, cada uno por separado, realizó una serie de descubrimientos revolucionarios. Comenzaremos en la década de 1990, con Kitagawa, quien trabajaba en la Universidad de Kindai, Japón.

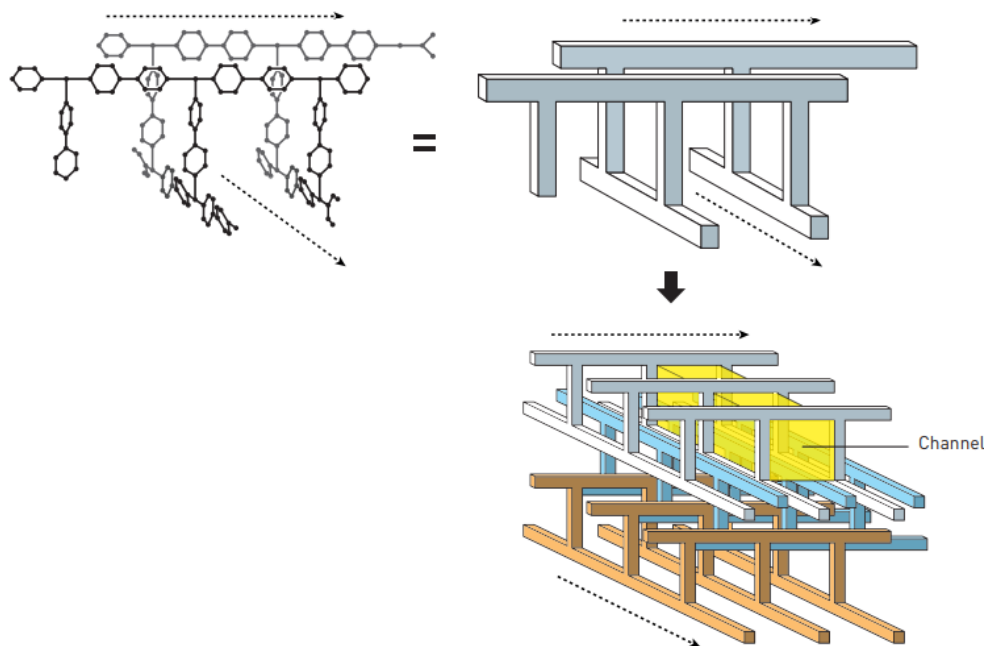
### **El lema de Kitagawa: Incluso lo inútil puede volverse útil**

A lo largo de su carrera investigadora, Susumu Kitagawa ha seguido un principio fundamental: intentar ver "la utilidad de lo inútil". De joven estudiante, leyó un libro del Premio Nobel Hideki Yukawa. En él, Yukawa mencionaba a un antiguo filósofo chino, Zhuangzi, quien afirma que debemos cuestionar lo que creemos útil. Incluso si algo no aporta un beneficio inmediato, puede resultar valioso.

Por consiguiente, cuando Kitagawa comenzó a investigar el potencial de crear estructuras moleculares porosas, no creía que tuvieran un propósito específico. Cuando presentó su primera construcción molecular en 1992, no era particularmente útil: un material bidimensional con cavidades donde podían ocultarse moléculas de acetona. Sin embargo, era el resultado de una nueva forma de pensar en el arte de construir con moléculas. Al igual que Robson, utilizó iones de cobre como piedras angulares, unidos entre sí por moléculas más grandes.

Kitagawa quería seguir experimentando con esta nueva tecnología de construcción, pero cuando solicitó subvenciones, quienes financiaban la investigación no consideraron que sus ambiciones tuvieran sentido. Los

materiales que creó eran inestables y carecían de propósito, por lo que muchas de sus propuestas fueron rechazadas.



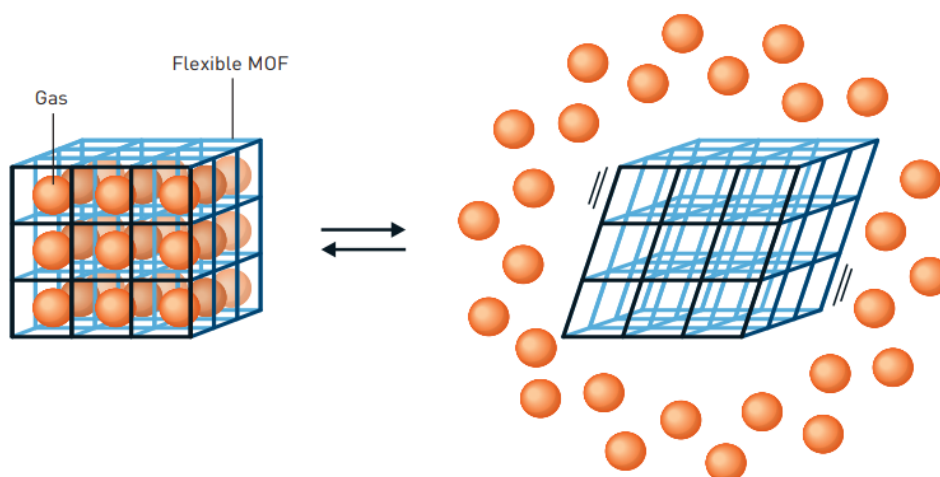
*Figura 3. En 1997, Kitagawa logró crear una estructura organometálica intersectada por canales abiertos. Estos podían llenarse con diferentes tipos de gas. El material podía liberar estos gases sin afectar su estructura. ©Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias*

Sin embargo, no se rindió y en 1997 logró su primer gran avance. Utilizando iones de cobalto, níquel o zinc y una molécula llamada 4,4'-bipiridina, su grupo de investigación creó estructuras organometálicas tridimensionales intersectadas por canales abiertos (Figura 3). Al secar uno de estos materiales, vaciándolo de agua, se volvió estable e incluso los espacios pudieron llenarse de gases. El material podía absorber y liberar metano, nitrógeno y oxígeno sin cambiar de forma.

### **Kitagawa ve la singularidad de sus creaciones.**

Las construcciones de Kitagawa eran estables y cumplían una función, pero quienes financiaban la investigación aún no veían su atractivo. Una razón era que los químicos ya contaban con zeolitas, materiales estables y porosos, que podían construir a partir de dióxido de silicio. Estas pueden absorber gases, así que ¿por qué alguien desarrollaría un material similar que no funcionara tan bien?





*Figura 4. En 1998, Kitagawa propuso que las estructuras organometálicas podrían ser flexibles. Actualmente existen numerosos MOF flexibles que pueden cambiar de forma, por ejemplo, al llenarse o vaciarse de diversas sustancias. ©Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias*

Susumu Kitagawa comprendió que, para recibir subvenciones importantes, debía definir qué hacía únicas a las estructuras metalorgánicas. Así, en 1998, describió su visión en el Boletín de la Sociedad Química de Japón. Presentó varias ventajas de los MOF. Por ejemplo, pueden crearse a partir de muchos tipos de moléculas, lo que supone un enorme potencial para integrar diferentes funciones. Además, y esto es importante, se dio cuenta de que los MOF pueden formar materiales blandos. A diferencia de las zeolitas, que suelen ser materiales duros, los MOF contienen bloques de construcción moleculares flexibles (Figura 4) que pueden crear un material maleable.

Después de esto, solo le quedaba poner en práctica sus ideas. Kitagawa, junto con otros investigadores, comenzó a desarrollar MOF flexibles. Mientras trabajan en esto, nos centraremos en Estados Unidos, donde Omar Yaghi también se dedicó a llevar la arquitectura molecular a nuevas cotas.

### **Una visita secreta a la biblioteca le abre los ojos a la química**

Estudiar química no fue una opción obvia para Omar Yaghi. Él y sus numerosos hermanos crecieron en una sola habitación en Amán, Jordania, sin electricidad ni agua corriente. La escuela era un refugio de una vida por lo demás desafiante. Un día, cuando tenía diez años, se coló en la biblioteca de la escuela, que solía estar cerrada con llave, y cogió un libro al azar de la estantería. Al abrirla, sus ojos se sintieron atraídos por imágenes ininteligibles pero cautivadoras: su primer encuentro con las estructuras moleculares.

A los 15 años, y siguiendo las estrictas instrucciones de su padre, Yaghi se mudó a Estados Unidos para estudiar. Se sintió atraído por la química y, con el tiempo, por el arte de diseñar nuevos materiales, pero la forma tradicional de construir nuevas moléculas le resultaba demasiado impredecible. Normalmente, los químicos combinan sustancias que deben reaccionar entre sí en un recipiente. Luego, para iniciar la reacción química, calientan el recipiente. Se forma la molécula deseada, pero a menudo también viene acompañada de diversos subproductos contaminantes.

En 1992, cuando Yaghi asumió su primer puesto como líder de grupo de investigación en la Universidad Estatal de Arizona, buscaba formas más controladas de crear materiales. Su objetivo era utilizar el diseño racional para conectar diferentes componentes químicos, como piezas de Lego, y crear cristales grandes. Esto resultó ser un desafío, pero finalmente lo lograron cuando el grupo de investigación comenzó a combinar iones metálicos con moléculas orgánicas.

En 1995, Yaghi publicó la estructura de dos materiales bidimensionales diferentes; estos eran como redes y se mantenían unidos por cobre o cobalto. Este último podía albergar moléculas huésped en sus espacios y, cuando éstos estaban completamente ocupados, era tan estable que podían calentarse a 350°C sin colapsar. Yaghi describe este material en un artículo en *Nature*, dónde acuña el nombre de "estructura metalorgánica"; este término se utiliza actualmente para describir estructuras moleculares extendidas y ordenadas que potencialmente contienen cavidades y están formadas por metales y moléculas orgánicas (carbonadas).

### **Tan solo unos gramos de la estructura de Yaghi pueden contener un campo de fútbol**

Yaghi marcó un hito en el desarrollo de estructuras metalorgánicas en 1999, al presentar al mundo el MOF-5. Este material se ha convertido en un clásico en este campo. Se trata de una construcción molecular excepcionalmente espaciosa y estable. Incluso vacío, puede calentarse a 300°C sin colapsar.

Sin embargo, lo que sorprendió a muchos investigadores, fue la enorme área que se esconde dentro de los espacios cúbicos del material. Un par de gramos de MOF-5 contienen un área tan grande como un campo de fútbol, lo que significa que puede absorber mucho más gas que una zeolita (Figura 5).

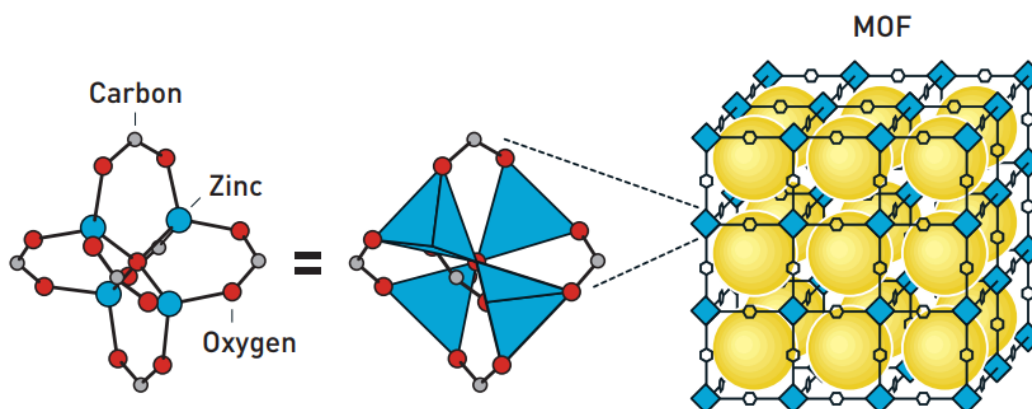


Figura 5. En 1999, Yaghi construyó un material muy estable, MOF-5, que presenta espacios cúbicos. Tan solo un par de gramos pueden contener un área tan grande como un campo de fútbol. ©Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias.

En cuanto a las diferencias entre las zeolitas y los MOF, los investigadores tardaron solo unos años en desarrollar MOF blandos. Uno de los que logró presentar un material flexible fue el propio Susumu Kitagawa. Al llenarse de agua o metano, su material cambiaba de forma, y al vaciarse, recuperaba su



forma original. El material se comportaba como un pulmón capaz de inhalar y exhalar gas, cambiante pero estable.

### **El grupo de investigación de Yaghi crea agua potable a partir del aire del desierto**

Omar Yaghi sentó las bases de las estructuras metalorgánicas en 2002 y 2003. En dos artículos, publicados en *Science & Nature*, demuestra que es posible modificar y cambiar los MOF de forma racional, dotándolos de diferentes propiedades. Una de sus iniciativas fue producir 16 variantes de MOF-5, con cavidades tanto más grandes como más pequeñas que las del material original (Figura 6). Una variante podría almacenar enormes volúmenes de gas metano, lo que, según Yaghi, podría utilizarse en vehículos alimentados con GNR.

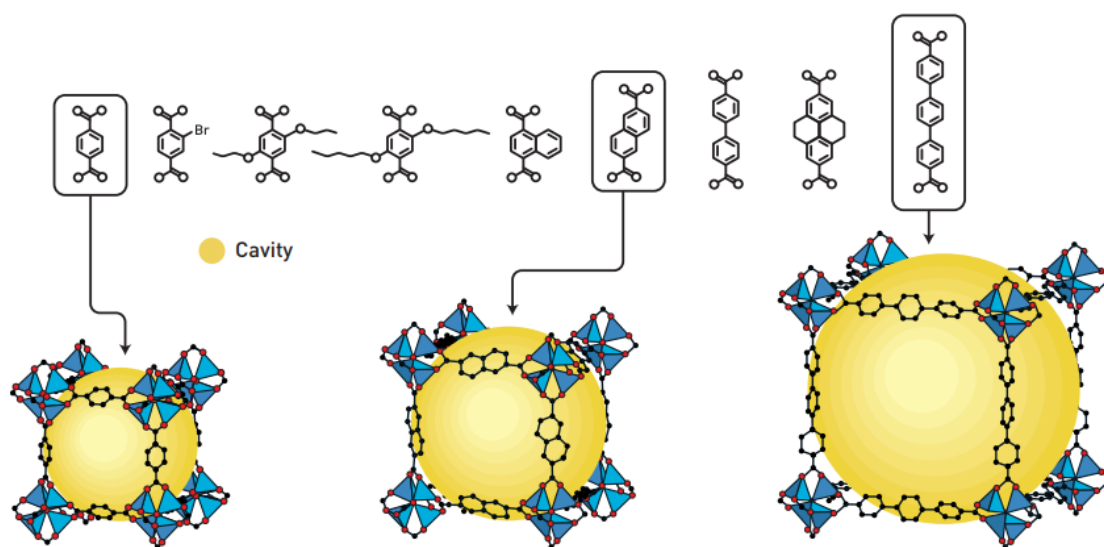


Figura 6. A principios de la década de 2000, Yaghi demostró que es posible producir familias enteras de materiales MOF. Varió los enlaces moleculares, lo que resultó en materiales con diferentes propiedades. Estos incluyen 16 variantes de MOF-5, con cavidades de diversos tamaños. ©Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias.

Posteriormente, las estructuras metalorgánicas han revolucionado el mundo. Los investigadores han desarrollado un kit molecular con una amplia gama de piezas que permiten crear nuevos MOF. Estos presentan diferentes formas y características, lo que ofrece un potencial increíble para el diseño racional (o basado en IA) de MOF para diferentes propósitos.

La Figura 7 ofrece ejemplos de cómo se pueden utilizar los MOF. Por ejemplo, el grupo de investigación de Yaghi ha recolectado agua del aire del desierto de Arizona. Durante la noche, su material MOF capturó el vapor de agua del aire. Al amanecer y al calentarse el sol, pudieron recolectar el agua.

### **Materiales MOF que capturan dióxido de carbono y gases tóxicos**

Los investigadores han creado numerosos MOF diferentes y funcionales. Hasta ahora, en la mayoría de los casos, estos materiales solo se han utilizado a pequeña escala. Para aprovechar los beneficios de los materiales MOF para

la humanidad, muchas empresas están invirtiendo en su producción y comercialización en masa. Algunas han tenido éxito. Por ejemplo, la industria electrónica ahora puede utilizar materiales MOF para contener algunos de los gases tóxicos necesarios para producir semiconductores. Otro MOF puede, en cambio, descomponer gases nocivos, incluyendo algunos que pueden utilizarse como armas químicas. Numerosas empresas también están probando materiales que pueden capturar dióxido de carbono de fábricas y centrales eléctricas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

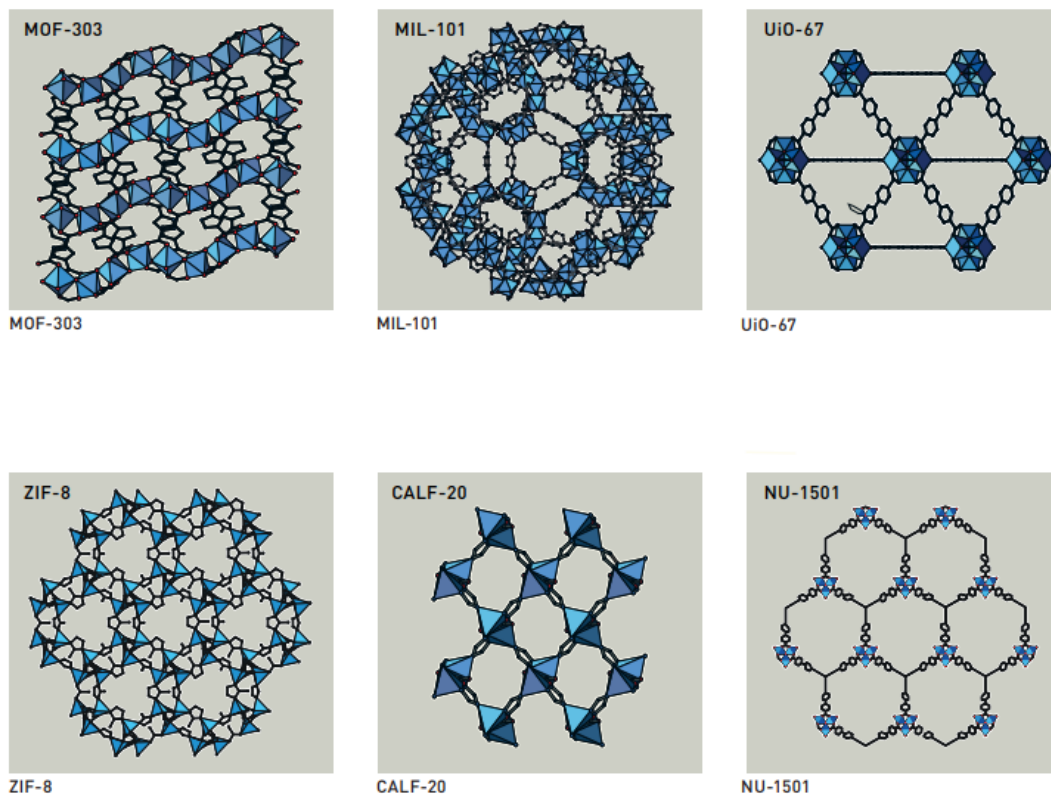


Figura 6. Ejemplos de estructuras metalorgánicas. ©Johan Jarnestad/Real Academia Sueca de Ciencias

**MOF-303:** puede capturar vapor de agua del aire del desierto durante la noche. Cuando el sol calienta el material por la mañana, libera agua potable.

**MIL-101:** tiene cavidades gigantescas. Se ha utilizado para catalizar la descomposición de petróleo crudo y antibióticos en agua contaminada. También puede utilizarse para almacenar grandes cantidades de hidrógeno o dióxido de carbono.

**UiO-67:** puede absorber PFAS del agua, lo que lo convierte en un material prometedor para el tratamiento de aguas y la eliminación de contaminantes.

**ZIF-8:** se ha utilizado experimentalmente para la extracción de tierras raras de aguas residuales.

**CALF-20:** tiene una capacidad excepcional para absorber dióxido de carbono. Se está probando en una fábrica de Canadá.

**NU-150:** se ha optimizado para almacenar y liberar hidrógeno a presión normal. El hidrógeno puede utilizarse como combustible para vehículos, pero en tanques convencionales de alta presión, el gas es extremadamente explosivo.

Algunos investigadores creen que las estructuras metalorgánicas tienen un potencial tan enorme que serán el material del siglo XXI. El tiempo lo dirá, pero mediante el desarrollo de estas estructuras, Susumu Kitagawa, Richard Robson y Omar Yaghi han brindado a los químicos nuevas oportunidades para resolver algunos de los desafíos que enfrentamos. Por lo tanto, como afirma el testamento de Alfred Nobel, han aportado el mayor beneficio a la humanidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chamizo, J. A. (2018). *Química general: Una aproximación histórica* (1.<sup>a</sup> ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://editorialfq.unam.mx/>
- Corona-González, M. & Rufian, E. (2024). Compuestos organometálicos y sus reacciones más comunes. *Quimiofilia*. 1. DOI: 10.56604/qfla202431organometalica315
- The Nobel Prize in Chemistry 2025, The Royal Swedish Academy of Sciences, [www.kva.se](http://www.kva.se)