

Premio Nobel de Química a los diseñadores de estructuras metalorgánicas

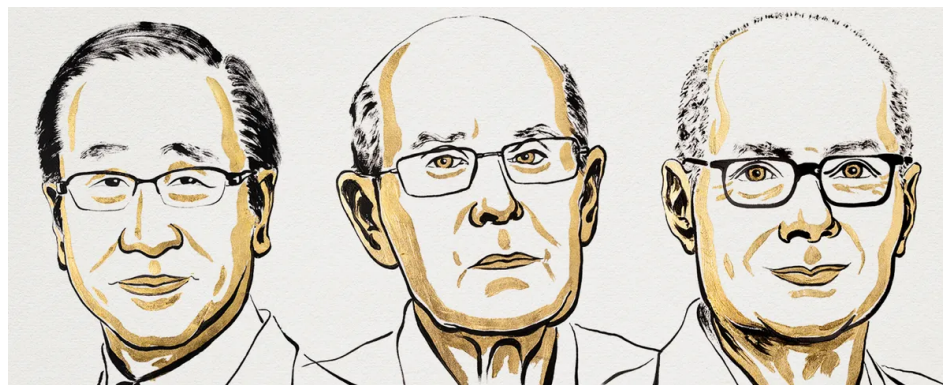
Nobel Prize in Chemistry awarded to designers of metal-organic frameworks

La Real Academia Sueca de Ciencias otorgó el Premio Nobel de Química de 2025 a tres científicos por la síntesis de estructuras metalorgánicas (*metal-organic frameworks* - MOF) de singular importancia. Al hacer el anuncio, el presidente del Comité Nobel de Química, profesor Heiner Linke, comentó que este material sintético se parecía a la cartera de Hermione.

Para los lectores de este comentario que no conozcan las historias de Harry Potter hay que explicar que Hermione era su mejor amiga en Hogwarts, la academia de magia donde los dos estudiaban. Hermione era una estudiante muy aventajada y en su pequeña cartera llevaba, obviamente por arte de magia, mil cosas que por fuera ocupaban un volumen inmensamente mayor que el de la carterita. Para ser más claro, y que me entiendan también quienes fueron niños antes de Harry Potter, diría que esa carterita se parecía a la de Mary Poppins, de la que ella sacaba lámparas, percheros, muebles y hasta matas bien crecidas.

Los lectores serios de esta reseña me perdonarán si les parece esta una introducción infantil, pero no es ocurrencia mía; así fue presentado el premio y así apareció la noticia en casi todos los diarios del mundo. Hay que decir que el profesor Linke no estaba muy lejos de la verdad.

El primer premiado es Richard Robson, Profesor Honorario de la Escuela de Química en la Universidad de Melbourne en Australia. En 1989 el Profesor Robson publicó los detalles de la síntesis de una estructura química interesante, no existente en la naturaleza (**Hoskins & Robson**, 1989). Según explicó, inspirado en el cristal de diamante, se le ocurrió que podría construir algo parecido y, así, diseñó con sus colaboradores un material de forma piramidal con átomos de cobre en los vértices, unidos por cadenas orgánicas de diversos tipos. Los espacios internos del cristal de diamante son pequeños, pero en estas nuevas estructuras imaginadas por Robson los espacios seguramente serían mucho más grandes y podrían albergar moléculas diversas. A medida que continuó desarrollándolas, muchos otros grupos se unieron al esfuerzo y desde entonces se han creado decenas de miles de estructuras MOF con ese mismo esquema (**Robson**, 2024).



Susumu Kitagawa, Richard Robson, and Omar Yaghi ganaron el Premio Nobel de Química de este año. Imagen tomada de <https://www.nobelprize.org/>

Hacia el final de la década de 1990, Susumu Kitagawa, Profesor Distinguido del Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Kyoto, Japón, desarrolló un tipo de MOF que podía ‘llenarse’ con moléculas de agua y era suficientemente estable para ser secado subsecuentemente, de manera que dejara espacios internos que podrían llenarse con un gas o con otras moléculas diferentes (Susumu & Mitsuru, 1984). Estos avances fueron de radical importancia para las aplicaciones que ya se preveían. Además, se podían generar condiciones sencillas, generalmente un calentamiento suave, para que el material atrapado se liberara cuando fuera necesario. Las uniones del material extraño en el interior de las estructuras eran adsorciones débiles que podían romperse fácilmente con calor u otros medios.

El tercer honrado con el Nobel es Omar M. Yaghi, Profesor de Química de la Universidad de California en Berkeley y fundador y director del Instituto de Ciencia Global de Berkeley, cuya misión es construir centros de investigación en países subdesarrollados para dar oportunidades de formación de excelencia a jóvenes científicos de esos países. Yaghi logró crear estructuras mucho más estables usando grupos (*clusters*) de iones metálicos, como los de zinc y oxígeno, unidos con cadenas diversas, generalmente las que tienen grupos carboxilo incorporados (Yaghi *et al.*, 1995). Logró, además, aumentar significativamente la superficie interna de las estructuras, alargando esas cadenas mucho más que las de estudios precedentes. Las estructuras MOF obtenidas por él resultaron extraordinariamente estables, incluso a temperaturas relativamente altas, de alrededor de 300 °C, lo que permitía intercambiar las moléculas atrapadas dentro de la estructura con mucha mayor facilidad.

La característica excepcionalmente interesante de estas estructuras metalorgánicas, que ya mencioné, pero quizás sin el énfasis suficiente, es que conforman en su interior una red extensa y compleja de ‘túneles y cuevas’ que les confiere una enorme superficie interna, disponible para la adsorción o captura de muy diversas moléculas. Para dar una idea de la magnitud de dicha superficie, uno de los productos mejor conocidos, la MOF CALF 20 (que hoy se elabora industrialmente), tiene una superficie interna de 7.000 m² por gramo de material, lo que equivale a decir que una MOF del tamaño de un cubo de azúcar contiene en su interior la superficie correspondiente a una cancha de fútbol. El material resulta ser una especie de esponja capaz de absorber, retener y liberar (cuando es necesario) grandes cantidades de gases o líquidos. De ahí la presentación del profesor Linke comparándolo con la cartera de Hermione, y la mía, más anticuada, con la maleta de Mary Poppins.

El Comité Nobel de Química destacó el gran ingenio de los investigadores para construir moléculas de alta complejidad, inexistentes en forma natural, capaces de crear en su interior nichos moleculares que, además de una dimensión inmensa, pueden diseñarse a la medida para ‘albergar’ las diferentes moléculas que quieran atraparse y separarse.

En el tiempo transcurrido desde los trabajos preliminares de diseño y síntesis piloto, se ha creado una gran variedad de MOF con objetivos precisos, y se han empezado a desarrollar proyectos de aplicación ingeniosos y de gran utilidad. Mencionaré solo algunos pocos para dar una idea del impacto real, pero ya hay en la literatura miles de artículos científicos en este campo.

Una de las primeras aplicaciones contempladas fue la captura del CO₂ expelido por las chimeneas de plantas industriales y calderas. Dadas las muy conocidas implicaciones que ello tiene para el cambio climático global, no es necesario argumentar demasiado sobre la importancia ambiental que entraña la posibilidad de atrapar el CO₂ antes de que se libere a la atmósfera. Eso que en teoría se concibió como una posibilidad mediante el uso de las MOF, hoy ya es una realidad en la producción industrial. La multinacional europea BASF-SE produce cientos de toneladas del sorbente CALF 20, el cual captura CO₂ separándolo de otros gases, como el N₂ del aire. La empresa suiza NovoMOF AG tiene un producto similar, algo menos avanzado que el anterior, pero que también se produce a nivel industrial. Decarbontek, Inc., otra compañía pionera en este campo, ha lanzado comercialmente una MOF denominada DCF1 con ese mismo objetivo; su producción, que todavía es modesta, significa que ya hay otra empresa operando en el mercado de captación de CO₂.

Otra aplicación de gran importancia se finca en la posibilidad de atrapar agua de la atmósfera, incluso en zonas desérticas, y devolverla al usuario como agua potable usando aparatos portátiles de bajo peso. Se han desarrollado MOF capaces de adsorber agua del aire en zonas con baja humedad relativa, entre ellas cabe mencionar la MOF-801 (MOF801 = $Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarato})_6$), que logra extraer del aire 2,8 litros/día por cada kilogramo de MOF utilizado, en condiciones de 20 % de humedad relativa (es decir condiciones muy secas, como las de los desiertos). Después de capturada de la atmósfera, el agua se le devuelve al usuario usando la energía producida por un pequeño panel solar común y corriente. Los equipos de este tipo pueden suministrar agua potable a comunidades o grupos que viven en zonas muy áridas y aisladas, sin acueductos ni acuíferos de otro tipo, con todo lo que eso significa para esas poblaciones humanas. Hay varios proyectos similares que recurren a diferentes MOF.

También se han propuesto productos MOF que podrán utilizarse en sistemas de purificación de aguas: la empresa Watch Water GmbH (Alemania) ofrece una MOF llamada “FERROLOX-X” en forma granulada para adsorber y así eliminar metales pesados, arsénico, fosfatos, cromatos y más. La misma empresa ha presentado su producto “HydroSorb” como un sistema de adsorción que utiliza MOF para eliminar pesticidas, residuos farmacéuticos, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas empleadas en la fabricación de superficies no adherentes, así como metales pesados.

La compañía NovoMOF desarrolló un sistema de desalinización por adsorción de sales con MOF. Hay otros productos en proceso, pero el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales con esta tecnología todavía debe superar desafíos de estabilidad de materiales y costos de producción.

Una de las estrategias para la transición energética a sistemas que no producen gases de efecto invernadero es la acumulación y el transporte de energía usando el H_2 que se produce con los excedentes de energías solar y eólica, el combustible no contaminante ideal. Sin embargo, su transporte es un reto importante porque el H_2 es explosivo y se requiere alta presión y muy baja temperatura para que se mantenga en estado líquido. Estos problemas logísticos podrán resolverse con menor riesgo y menos requisitos tecnológicos costosos si dicho combustible se transporta adsorbido en un soporte sólido inerte que mantenga la temperatura y la presión ideales, para lo cual se han desarrollado MOF que podrían almacenarlo en grandes cantidades.

Asimismo, las MOF ofrecen una gran oportunidad para el desarrollo de nuevos catalizadores. Por un lado, muchas reacciones se podrán acelerar acercando las moléculas reactantes y manteniéndolas en un espacio reducido. Por otro, es posible introducir sitios activos en esas estructuras MOF (metales y grupos funcionales) para acelerar o dirigir reacciones químicas específicas.

Al recomendar el premio Nobel para este desarrollo, el Comité Nobel de Química señaló que abre posibilidades para el diseño de materiales novedosos y constituye una verdadera “arquitectura molecular”. Más allá de una aplicación concreta, el premio destaca el hecho general de que las MOF permiten crear ‘habitaciones moleculares’ dentro de un sólido, cavidades que se pueden ‘personalizar’ para albergar distintos invitados químicos.

Se premió, así, la inventiva, la imaginación y la habilidad para concebir y sintetizar lo que no existe. En este caso, además, ya ha pasado el tiempo suficiente desde los experimentos iniciales para que se hayan dado, a partir de las ideas originales, avances tecnológicos de impacto real y pruebas piloto que están a punto de producir otros adicionales.

La idea original se ha ramificado y multiplicado en miles de artículos científicos, en centenares de nuevas estructuras sintetizadas y en decenas de patentes industriales, varias ya en producción. Se unen en este premio la teoría brillante y su aplicación de gran impacto.

Moisés Wasserman Ph.D.

Profesor Emérito - Universidad Nacional

Académico Honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Referencias

- Hoskins, B. F. & Robson, R.** (1989). Infinite polymeric frameworks consisting of three dimensionally linked rod-like segments. *Journal of the American Chemical Society*, *111* (15), 5962-5964. <https://doi.org/10.1021/ja00197a079>
- Robson R.** (2024). The historical development of the concepts underlying the design and construction of targeted coordination polymers/MOFs: A personal account. *Chemical Record*, *24*(5), e202400038. <https://doi.org/10.1002/tcr.202400038>
- Susumu, K. & Mitsuru, K.** (1998). Functional Micropore Chemistry of Crystalline Metal Complex-Assembled Compounds. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, *71*, 1739–1753. <https://doi.org/10.1246/bcsj.71.1739>
- Yaghi, O. M., Guanming, L., Hailian, L.** (1995). Selective binding and removal of guests in a microporous metal–organic framework. *Nature*, *378*, 703-706. <https://doi.org/10.1038/378703a0>