

GELES METAL-ORGÁNICOS: HACIA NUEVOS MATERIALES MULTIFUNCIONALES

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

METAL-ORGANIC GELS: TOWARDS NEW
MULTIFUNCTIONAL MATERIALS

JARAMILLO GARCÍA, JONATHAN ¹

MORALES LUCKIE, Raul Alberto ¹

SÁNCHEZ MENDIETA, Víctor ¹

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio ^{1,2}

RESUMEN

Con el creciente interés en la búsqueda de nuevos materiales avanzados que muestren una amplia variedad de aplicaciones, han surgido investigaciones sobre geles metal-orgánicos (GMO). Esto debido a su estructura porosa, gran área superficial específica y la forma en que se pueden modificar o modular para exhibir estructuras porosas. Existen distintas estrategias para la incorporación de metales en geles supramoleculares, basando sus diseños en organogeladores, incluyendo la incorporación de organogeladores de bajo peso molecular y polímeros de coordinación o MOF. La revisión de este artículo se centra en las potenciales aplicaciones en el campo médico, farmacéutico, catálisis y detección de moléculas aprovechando sus propiedades luminiscentes y de autocuración.

Palabras clave: gel; geles metal-orgánicos; detección de moléculas; autocuración.

ABSTRACT

With the growing interest in the search for new advanced materials with a wide variety of applications, research on metal-organic gels (MOG) has emerged. This is due to their porous structure, large specific surface area, and the way they can be modified or modulated to exhibit porous structures. There are different strategies for incorporating metals into supramolecular gels, basing their designs on organogelators, including the incorporation of low molecular weight organogelators and coordination polymers (MOF). The review in this article focuses on potential applications in the medical, pharmaceutical,

1. Facultad de Química, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

2. División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible, Universidad Politécnica del Valle de Toluca. Almoloya de Juárez, Estado de México, México.

Correspondencia
antoniotellez712@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-4212-2257>
Fecha de recepción
27 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
13 de mayo de 2026.

catalytic, and molecular detection fields, taking advantage of their luminescent and self-healing properties.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Keywords: gel; metal-organic gels; sensing; self-healing.

INTRODUCCIÓN

Un gel se compone principalmente de una pequeña cantidad de gelificante y un gran volumen de líquido. Típicamente, un gel se forma cuando una solución que contiene una concentración crítica de gelificante (MGC, por sus siglas en inglés) se calienta y enfría por debajo de una temperatura crítica (temperatura de transición sol-gel). Si el volumen total del líquido es capaz de soportar su propio peso bajo influencia la fuerza gravitacional (normalmente probado por la inversión del tubo), se le llama gel (Figura 1) (Adarsh & Dastidar, 2011).



Figura 1. Representación de un gel.

Los polímeros de coordinación o los también denominados MOF (por sus siglas en inglés metal organic frameworks), son materiales formados por metales (o iones metálicos) unidos por moléculas orgánicas que funcionan como puentes, llamados ligantes, una representación de dichos compuestos se muestra en la Figura 2. Se caracterizan por tener distintas propiedades generando múltiples funcionalidades (Miklaszewska & Wagner, 2025).

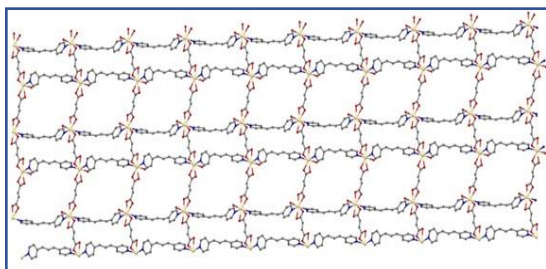


Figura 2. Estructura de un MOF, donde se observan los poros formados por el tipo de ligante.

Los geles metal-orgánicos han generado amplio interés debido a su potencial diseño en sistemas de materiales multifuncionales. Una de las principales razones se debe a su arquitectura basada en la reticulación de nodos metálicos por medio de ligantes orgánicos flexibles. Esto les confiere propiedades únicas, generando un comportamiento mecánico adaptable, que permite la formación de redes estables pero dinámicas capaces de soportar esfuerzos externos sin perder integridad estructural (Zhuang y col., 2020).

Las redes sólidas en los geles están compuestas de una pequeña cantidad (normalmente menos del 5 % en peso) de gelificantes poliméricos o gelificantes de bajo peso molecular. Esas moléculas gelificantes se autoensamblan en solventes orgánicos o agua a través de varias interacciones no covalentes reversibles, tales como puentes de hidrógeno, interacciones dipolares, interacciones electrostáticas y apilamiento π o efecto hidrofóbico, lo que facilita su crecimiento unidimensional para formar fibrillas (Sutar & Maji, 2016).

La incorporación de metales lábiles o aniones dentro de estos geles supramoleculares es de particular interés porque los GMO y polímeros de coordinación en gel con estructuras metal-orgánicas son aplicables en varios campos como la capacidad de respuesta redox, acción catalítica, luminiscencia, magnetismo y emisión de electrones (Lee y col., 2012).

Los GMO son materiales viscoelásticos blandos en los que un gran volumen de líquido (solventes gelificantes) es inmovilizado (gelificado) dentro de una red 3D generada por un enlace de coordinación entre ligantes orgánicos y centros metálicos que incluyen complejos de coordinación discretos, polímeros de coordinación infinitos y polímeros de coordinación con enlaces cruzados (Husain y col., 2015).

Por ello, los GMO han emergido como una de las plataformas más prometedoras en la ciencia de materiales contemporánea, contribuyendo significativamente al diseño racional de materiales multifuncionales con aplicaciones en sectores estratégicos de alto impacto tecnológico y ambiental.

METODOLOGÍA

TIPO DE ESTUDIO

Este manuscrito corresponde a una revisión bibliográfica de tipo sistemática con enfoque cualitativo y documental, orientada al análisis del estado del arte sobre geles metal-orgánicos. El objetivo general consistió en identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible relacionada con los métodos de síntesis, principales propiedades y sus aplicaciones.

FUENTES DE INFORMACIÓN

La recopilación de información se llevó a cabo mediante la consulta de bases de datos científicas internacionales indexadas y revisadas por pares, reconocidas por su rigor académico y amplia cobertura en el área de geles metal-orgánicos. Las bases de datos utilizadas fueron *ScienceDirect*, *Scopus* y *Wiley Online Library*. Estas plataformas permitieron acceder a artículos científicos, revisiones especializadas y publicaciones de alto impacto relacionadas con geles metal-orgánicos.

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el uso de palabras clave relacionadas con el tema de estudio, tanto en idioma inglés como en español, con el propósito de garantizar una cobertura amplia y representativa de la literatura científica. Se emplearon operadores booleanos (AND, OR, NOT) para optimizar la precisión y pertinencia de los resultados obtenidos.

Entre las principales formas de búsqueda utilizadas se incluyeron las siguientes:

- metal-organic gels AND synthesis
- metal-organic gels AND self-healing
- metal-organic gels OR mechanical properties
- metal-organic gels AND applied in sensing
- geles metal-orgánicos AND aplicaciones en liberación controlada de fármacos
- geles metal-orgánicos AND luminiscencia

El periodo temporal considerado comprendió publicaciones realizadas en los últimos quince años, con el fin de incluir avances recientes y tendencias emergentes en el desarrollo tecnológico de geles metal-orgánicos.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Se establecieron criterios específicos para la selección de la literatura científica con el propósito de garantizar la calidad, relevancia y pertinencia de la información recopilada.

Los criterios de inclusión fueron:

- Artículos científicos revisados por pares.
- Publicaciones relacionadas directamente con la síntesis, caracterización, propiedades, autocuración, luminiscencia y aplicaciones de los geles metal-orgánicos.
- Documentos publicados en idioma inglés.
- Estudios experimentales, teóricos y revisiones científicas especializadas.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- Estudios duplicados identificados en diferentes bases de datos.
- Publicaciones sin acceso al texto completo.

PROCESO DE SELECCIÓN DE LITERATURA

El proceso de selección de la información se realizó mediante un filtrado progresivo basado en la revisión de títulos, resúmenes y textos completos de las publicaciones identificadas. Inicialmente, se efectuó una depuración para eliminar registros duplicados obtenidos en múltiples bases de datos. Posteriormente, se evaluó la pertinencia temática de los estudios mediante la lectura de resúmenes. Finalmente, se llevó a cabo la revisión detallada de los textos completos para seleccionar los trabajos que cumplieran con los criterios establecidos.

EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información relevante obtenida de los estudios seleccionados se organizó mediante matrices de análisis estructuradas, en las cuales se registraron variables específicas relacionadas con la síntesis, propiedades y aplicaciones



prácticas de los geles metal-orgánicos. Entre las variables consideradas se incluyeron los tipos de geles metal-orgánicos, métodos de síntesis, propiedades mecánicas, autocuración y luminiscencia. Además, aplicaciones en catálisis heterogénea, captura y almacenamiento de gases, detección de moléculas, liberación controlada de fármacos, remoción de contaminantes, almacenamiento de energía y materiales inteligentes.

El análisis de la información se realizó mediante una síntesis comparativa y crítica del contenido, permitiendo identificar similitudes, diferencias, avances tecnológicos y áreas de oportunidad en las aplicaciones de los geles metal-orgánicos.

ORGANIZACIÓN Y SÍNTESIS

Los hallazgos obtenidos se clasificaron y sistematizaron de acuerdo con las tendencias tecnológicas predominantes identificadas en la literatura científica especializada. La integración de la información se llevó a cabo considerando los avances más recientes en la optimización de la eficiencia, las estrategias orientadas a mejorar la estabilidad, las innovaciones en los métodos de síntesis y los principales retos tecnológicos, junto con las perspectivas futuras relacionadas con la aplicación de los geles metal-orgánicos. Esta estructuración facilitó la elaboración de un análisis integral y actualizado sobre el desarrollo científico y tecnológico en este campo de investigación.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

1. SÍNTESIS DE LOS GELES METAL-ORGÁNICOS (GMOS)

Entre diferentes criterios, la clasificación de los geles se basa generalmente en las fuerzas impulsoras de agregación molecular. Esto permite una distinción fundamental entre geles químicos (es decir, geles basados en enlaces covalentes, generalmente polímeros reticulados que no pueden redisolverse) y geles físicos (es decir, geles hechos de moléculas o polímeros de bajo peso molecular (LMW)), que se basan en enlaces no covalentes, principalmente enlaces de hidrógeno, Van der Waals, transferencia de carga, dipolo-dipolo,

apilamiento π - π , que típicamente conducen a transiciones reversibles de fase de gel a sol (Häring & Díaz, 2016).

El proceso de la formación de GMO se manifiesta en diferentes enfoques que incluyen redes de polímeros de coordinación, complejos de coordinación metálicos y organometálicos, polímeros de coordinación entrecruzados, e interacciones metal-ligante basados en la gelación. Diferentes iones de metales de transición como Co^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, y Zn^{2+} son utilizados para la metalogelación con múltiples aplicaciones en ciencia y tecnología. Sin embargo, también se ha reportado la síntesis de metalogeles basados en iones de lantánidos como Eu^{3+} , Tb^{3+} .

Adicionalmente los GMO se pueden clasificar según su método de síntesis en:

- GMO puros: están constituidos únicamente por un metal o ion metálico y un ligante orgánico, aquí las redes del gel se forman por las interacciones físicas entre las moléculas que componen al MOF. Debido a esto se reduce la separación media entre las partículas a un entrecruzamiento formando así una red de gel a partir de los monómeros que lo conforman, como se muestra en la Figura 3 (Zhang y col., 2018).

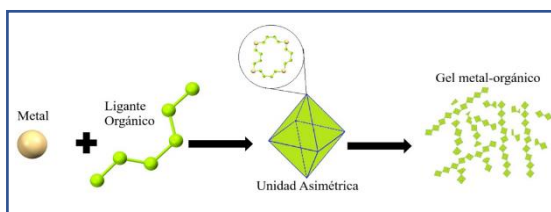


Figura 3. Esquema de la representación de GMO puros.

- GMO híbridos: en la Figura 4 se observa que los cristales de los MOF se encuentran incrustados en un componente gelificante como por ejemplo el grafeno y sus derivados. En esta clase las interacciones entre el MOF y la red del gel son débiles, donde el MOF se integra a la estructura del gel mediante síntesis *in situ* o por la agregación de nanopartículas de este en el gel (Zhuang y col., 2020).

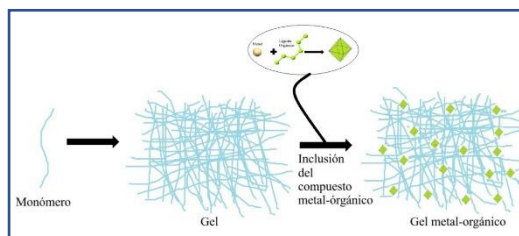


Figura 4. Esquema de la representación de GMO híbridos.

- GMO basados en reticulación: se forman por poliedros metal-orgánicos o cristales (nanocristales) de MOF que se reticulan mediante interacciones químicas o físicas fuertes y persistentes derivadas de los ligantes “entrecruzadores”, que unen los compuestos metal-orgánicos observados en la Figura 5. Esta reticulación se puede dar mediante enlaces covalentes o coordinados, incluso mediante enlaces de hidrógeno o interacciones de van der Waals (Liu y col., 2023).

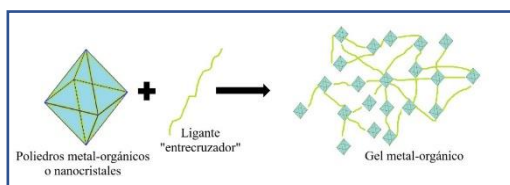
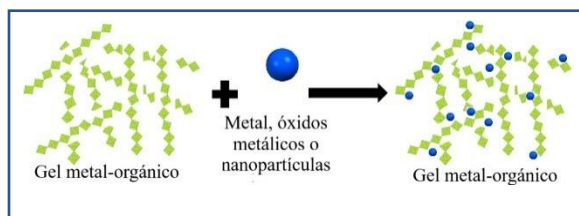


Figura 5. Esquema de la representación de GMO reticulados.

- Materiales derivados de los GMO: se muestran en la Figura 6 que tienen como precursor a un GMO o un material a base de gel, es decir, el nuevo gel formado proviene de la interacción de la red del compuesto metal-orgánico con el gel. Algunas ocasiones se generan por la incrustación de óxidos metálicos, metales o nanopartículas (Ma y col., 2023).

Figura 6. Esquema de la representación de GMO derivado.



La síntesis para los GMO puede seguir distintas rutas o metodologías dependiendo varios factores tales como la naturaleza metálica, el ligante o disolventes utilizados (se simplifica en el esquema de la Figura 7), por lo que las condiciones experimentales pueden ser:

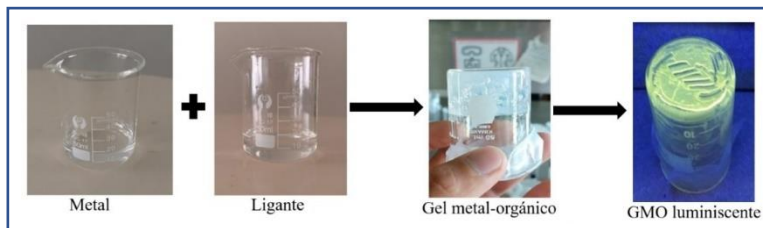


Figura 7. Esquema de la representación de la síntesis de un GMO (con propiedades luminiscentes).

- Autoensamblaje: la formación de GMO por autoensamble es una de las estrategias de síntesis más empleada en este campo, donde el crecimiento y modelado de estos materiales es controlado por interacciones supramoleculares intermoleculares y autocomplementarias; orientadas hacia la generación de una estructura matricial multidimensional. Para esto es necesario el diseño y creación de moléculas pequeñas que puedan dar lugar a la gelación con propiedades específicas, generando un gran desafío, ya que aquellas modificaciones, por mínimas que sean, pueden afectar en gran medida las propiedades macroscópicas del material resultante de una manera inesperada. Un ejemplo de esto se puede observar en los GMO formados con Ag^+ y 4,4'-bipiridina (Zhao y col., 2014).
- Solvotérmico/hidrotermal: se basa por la reacción de las sales metálicas y los ligantes orgánicos, en disolventes, mediante sistemas cerrados, con el uso de capsulas o viales herméticos a altas temperaturas (entre 80 y 200 °C). Estos disolventes usados actúan como medio y modulador de la reacción. Un ejemplo se puede observar en el GMO llamado UiO-66 (Zr-BDC) formado por Zr^{4+} y ácido 1,4-bencenodicarboxílico (BDC) (Zhuang y col., 2020).
- Entrecruzamiento de enlaces por polimerización de coordinación: se orienta la formación de los GMO por la reacción gradual entre metales multivalentes (Co^{2+} , Cu^{2+} , y Zn^{2+}) y ligantes multidentados (ácidos policarboxílicos, triazoles, etc.). Se caracteriza por tener control del grado de reticulación, rigidez y porosidad. Se puede observar en el gel Zn-BDC sintetizado por coordinación progresiva en DMF (Zhang y col., 2018).
- Enfriamiento o sol-gel: ocurre en una solución homogénea que contiene al metal y al ligante, donde la solución se transforma en gel

por la evaporación, enfriamiento o cambios en el pH. Se utiliza frecuentemente en geles reversible o regenerativos, como en los geles de Fe^{3+} y ácido tartárico que se gelifica al enfriar o incluso en algunos con Zr (Shaiful y col., 2021).

- Conversión de MOF a gel: se obtiene cuando un MOF parcialmente cristalino o coloidal se dispersa en un disolvente adecuado y se transforma en un gel (GMO) por la ruptura parcial de los enlaces o entrecruzamientos secundarios de enlaces. Se puede observar en la conversión de MIL-100(Fe), dicho compuesto se forma por la interacción del ligante ácido trimesico con el Fe^{3+} , en gel mediante redisolución parcial (Li y col., 2025).
- Métodos asistidos: se centra en la síntesis por microondas, ultrasonido o sin disolventes; los cuales buscan reducir el tiempo y el consumo energético, se caracterizan por ser una síntesis rápida (minutos), tener buen control del tamaño de partícula y la estructura de gel. Además de ser compatibles con estrategias sostenibles, como el caso de GMO Cu-triazol, sintetizado por microondas durante tres minutos a 120 °C (Cao y col., 2019).

Hoy en día, la síntesis de GMO ha sido generada principalmente por el uso de gelificantes orgánicos que han sido descubiertos casualmente. Sin embargo, recientemente el concepto de geles supramoleculares de multicomponentes ha sido introducido, donde, por ejemplo, los iones en conjunto con los agentes gelificantes basados en ligantes de coordinación con metales se han venido utilizando para obtener un mejor control sobre la estructura (y por lo tanto, morfología), así como sobre sus propiedades físicas y posibles aplicaciones (Martínez y col., 2015).

2. PRINCIPALES PROPIEDADES DE LOS GMO

Debido a sus fascinantes y múltiples propiedades, así como sus características estructurales, los GMO se han utilizado para diversas aplicaciones inminentes en una amplia gama de industrias científicas y comerciales. Así, los GMO han ganado una posición sólida en la investigación científica.

2.1 Propiedades mecánicas



Las propiedades reológicas proporcionan información del comportamiento de los geles cuando son sometidos a estrés mecánico, especialmente al módulo de "almacenamiento" (o "elástico") G' , el cual representa la habilidad del material deformado para regresar a su forma original, y el módulo de "pérdida" (o "viscosidad") G'' , el cual representa la tendencia del material a fluir bajo estrés.

Dos criterios reológicos requeridos para un gel son: 1) la independencia del módulo elástico dinámico, G' , con respecto a la frecuencia oscilatoria, y 2) G' debe exceder la pérdida del módulo G'' en alrededor de un orden de magnitud.

En general las propiedades reológicas de los polímeros de coordinación en gel son dependientes de la concentración del ión central, así como de los ligantes o moléculas gelificantes. Esto se puede comprobar con los siguientes trabajos reportados:

- Se realizó un barrido de deformación dinámica para definir las condiciones del análisis reológico en geles con distintas concentraciones de Zn^{2+} . En el rango de 0.1–1.0 % de deformación, G predominó sobre G'' , confirmando el comportamiento gelificado. Con 1.0 equivalente de Zn^{2+} , ambos módulos aumentaron notablemente frente a 0.3 y 0.6 equivalentes, evidenciando mayor estabilidad estructural debido a la formación de un complejo 1:1 entre el ligante tetrazólico y el Zn^{2+} (Lee y col., 2012).
- Los estudios reológicos confirman la naturaleza viscoelástica de estos materiales. El módulo de almacenamiento (G), asociado a la energía almacenada, es significativamente mayor que el módulo de pérdida (G''), relacionado con la energía disipada. En particular, para el metalogel Fe@TETA, el predominio de G sobre G' a determinada concentración evidencia su estabilidad estructural y su comportamiento predominantemente sólido (Dhibar y col., 2020).
- La afinidad entre los iones metálicos y los ligantes influye directamente en el comportamiento reológico de los geles. Los geles de Tb(III) y Eu(III) presentan una débil dependencia con la frecuencia y un

comportamiento predominantemente sólido ($G' > G''$), dentro de los valores característicos de un gel. En la mezcla Eu(III)/Tb(III), G'' se aproxima a G' a altas frecuencias, indicando una transición hacia un comportamiento más líquido. A bajas deformaciones, todos los sistemas muestran respuesta sólida hasta alcanzar la deformación de rendimiento, punto en el que el gel comienza a fluir y G' disminuye (Martínez y col., 2015).

2.2 Autocuración

Una de las propiedades más fascinantes de los materiales biológicos es su habilidad para regenerarse y curarse después de recibir un daño físico. De aquí que surge la idea para poder sintetizar materiales blandos con propiedades de autocurado.

El origen de algunos procesos naturales de autocuración (por ejemplo, fusión de huesos rotos, recuperación de la pared celular tras la deformación de la madera) se puede encontrar en la presencia de enlaces de sacrificio entre moléculas, que al romperse y reformarse permiten una mejor adaptación de los biomateriales a condiciones externas y generando así la reparación de materiales dañados (Zhang y col., 2019).

Los GMO son materiales que pueden presentar dicha propiedad, es decir, que presentan la capacidad de repararse a sí mismos después de sufrir un daño físico (fractura, corte o deformación), sin necesidad de intervención externa significativa. Lo que permite la autocuración en los GMO es la reversibilidad de los enlaces de coordinación, siguiendo el siguiente mecanismo:

1. Daño mecánico: cuando el gel se corta o deforma, se pueden romper los enlaces de coordinación entre el metal y el ligante, o incluso las interacciones no covalentes como puentes de hidrógeno o apilamiento π - π .
2. Reorganización espontánea: debido a la naturaleza de los enlaces que se encuentran en los GMO, que son dinámicos y reversibles. Los fragmentos pueden reconectarse de manera natural.
3. Recuperación de estructura y propiedades: el gel puede recuperar su forma, integridad estructural y en la mayoría de los casos, sus propiedades mecánicas y funcionales (conductividad o fluorescencia) (Sharma y col., 2019).

Esta propiedad se observa en algunos trabajos publicados donde algunos GMO fueron estudiados:

- El GMO presenta propiedades macroscópicas de autocurado, evidenciadas por la desaparición completa de una grieta de 6 mm en catorce minutos. Este comportamiento se atribuye a interacciones dinámicas y reversibles de coordinación metal-ligante que permiten la regeneración de la red del gel (Zhang y col., 2019).
- El monolito de GMO basado en ácido oxálico (CuA-Ox) mostró claras propiedades de autocurado sin afectar su desempeño al ser dopado con colorantes. Los geles presentaron autosoporte, buena capacidad de carga y maleabilidad, permitiendo su corte en bloques sin pérdida de líquido. Al poner en contacto bloques alternados (dopado/no dopado), estos se fusionaron espontáneamente en cinco horas sin agentes externos; este tiempo se redujo a diez minutos mediante sonicación durante aproximadamente 2 minutos (Feldner y col., 2016).
- Se sintetizó un GMO débil y autocurable empleando el ligante tritópico BTC con $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($G' \approx 250 \text{ Pa}$). El gel Ni_2 BTC mostró autocurado macroscópico en 48 h tras daño, a diferencia de un gel HAS con módulo similar que no presentó curación. Los ensayos de deformación evidenciaron recuperación inmediata pero parcial de la elasticidad después del cizallamiento. Ciclos repetidos provocaron fatiga asociada a menor conectividad estructural. En distintos protocolos, el gel recuperó una fracción significativa de su elasticidad, aunque no completamente (Terech y col., 2013).

Como se puede apreciar la capacidad de autocuración ya se puede discernir en las mediciones de recuperación por fluencia en el régimen lineal de deformaciones. Estos materiales autocurables pueden presentar magníficas propiedades no solo a nivel microscópico, sino a nivel macroscópico, dejando así el camino para múltiples aplicaciones como la liberación controlada de fármacos y catálisis (Marzabad y col., 2025).

2.3 Luminiscencia

Recientemente, ha aumentado el interés en el estudio de los GMO, debido a las amplias propiedades espectroscópicas y de luminiscencia exhibidas por una gran variedad de complejos de metales de transición (Lam y col., 2008).

Los GMO luminiscentes representan una clase sobresaliente de gelificantes. La presencia de interacciones metalofílicas y/o fuerzas no covalentes puede conducir a variaciones en las capacidades de gelificación y fascinantes propiedades fotofísicas (Iranifam, 2024).

Los estados excitados de transferencia de carga de metal a ligante (MLCT, por sus siglas en inglés) de estos sistemas organometálicos luminiscentes están bien documentados para mostrar grandes cambios de respuesta a las variaciones en el medio ambiente. Se cree que las abundantes propiedades fotofísicas de los estados excitados por MLCT de estos sistemas de complejos metálicos sirven como indicadores y sondeos espectroscópicos versátiles para los cambios en el ambiente. Además, el delicado equilibrio y la conformación de las interacciones no covalentes en estos gelificantes pueden modificarse fácilmente mediante la elección juiciosa y el diseño racional de los ligantes de coordinación en el sistema organometálico, puede dar lugar a un ajuste fino de las propiedades de gelificación de los gelificantes orgánicos de baja masa molecular (Lam y col., 2008). A continuación, se presentan algunos ejemplos de GMO luminiscentes:

- Se realizó un estudio de GMO de tricarbonil diimina alquilrenio(II) mediante espectroscopía UV-Vis dependiente de la temperatura (25–75 °C). Al aumentar la temperatura la banda MLCT ($\approx 400\text{--}450\text{ nm}$) disminuyó en absorbancia, coincidiendo con la transición de gel opaco a sol transparente en hexano y DMSO. Estos cambios se atribuyen a procesos de agregación en DMSO, asociados a interacciones de apilamiento π entre entidades aromáticas (Lam y col., 2008).
- Los GMO obtenidos a partir de 1,3,5-tris(3-piridilmetoxil) benceno y sales de Cd^{2+} , Hg^{2+} y Cu^{2+} presentan estructuras nanofibrosas y una luminiscencia blanca y verde al ser excitados a 325 nm. Esta emisión se atribuye a la interacción metal-ligante y a interacciones π - π . Además, demostraron potencial como sensores de compuestos

nitroaromáticos, como nitrobenzeno y 2,4-dinitrofenol (Roy y col., 2014).

- Se reportaron tres GMO fluorescentes sintetizados con Zn (OAc)₂·2H₂O, bpd y distintos ácidos dicarboxílicos, destacando el GMO 1 (con ácido tartárico) por su intensa emisión. Bajo excitación a 300 nm, el GMO 1 emite fuertemente a 455 nm debido a la transición π - π^* , mostrando mayor fluorescencia que el ligante libre y el complejo precursor. Los sistemas 2 y 3 emiten en la misma región, pero con menor intensidad. La mejora en la fluorescencia se atribuye a la mayor rigidez estructural inducida por la gelificación, que restringe movimientos moleculares y reduce procesos no radiativos (Batabyal y col., 2010).
- Se llevó a cabo la síntesis a temperatura ambiente de un GMO formado por Eu, Tb con el ligante 4'-(4-carboxifenil)-2,2':6',2"-terpiridina, teniendo una emisión electroquimioluminiscente cuando se excita alrededor de los 679 nm, exhibiendo alta estabilidad. Aplicándose en la detección de epinefrina con un muy buen rango lineal, límite de detección bajo (Xie y col., 2020).
- Se desarrollo un GMO termofijado basado en Tb³⁺ (H6L/Tb) con luminiscencia estable, utilizando H6L como ligante. El gel presenta una banda de excitación amplia (250–400 nm) y emisión a 544 nm. Los estudios a distintas temperaturas mostraron que la mezcla H6L/Tb³⁺ casi no emite entre 0–25 °C y presenta emisión débil hasta 55 °C; sin embargo, la luminiscencia aumenta notablemente entre 55–75 °C. Esto indica que el calentamiento favorece el autoensamblaje del sistema, promoviendo su emisión luminiscente (Zhang y col., 2020).

Como se ha podido ver en estos ejemplos la luminiscencia de un gel generalmente depende de la formación de un estado de gel de tipo sólido; por lo tanto, la luminiscencia comenzará a desaparecer a medida que se destruye la estructura supramolecular del gel.

3. APLICACIONES

Se han dedicado numerosos esfuerzos al desarrollo de GMO sensibles a los estímulos, donde las propiedades del sistema se pueden activar/desactivar o



ajustar en presencia de un estímulo químico o físico externo o interno (Rajamalli & Prasad, 2011). Derivado de ello se pueden observar una gran variedad de posibles aplicaciones que pueden tener los GMO en distintas áreas como farmacéuticas, biomédicas, remediación ambiental, catálisis, electroquímica y adsorción (Tabla 1).

Tabla 1. Aplicaciones de los GMO.

GMO	Aplicación	Descripción
Sistema formado por Cu(II) y como ligante el H ₂ btca (benzotriazol-5-carboxílico).	Catálisis heterogénea.	Este GMO mostró un excelente desempeño en reacciones de oxidación y reducción selectiva. Se emplea en la adsorción de colorantes, ya que cuenta con alta reusabilidad, fácil recuperación del catalizador y la posibilidad de ajustar la actividad modificando el metal o el ligante (Cao y col., 2023).
Sistema formado por Zn(II) y como ligante el ácido tereftálico (BDC).	Captura y almacenamiento de gases.	Su alta porosidad estructural, le permite presentar una adsorción en distintos gases tales como CO ₂ , H ₂ o CH ₄ . Luego entonces, apoyan a la mitigación de gases de efecto invernadero, purificación de mezclas gaseosas y almacenamiento de energía (Qiu y col., 2017).
Sistema formado por Eu(III) y como ligante el ácido benzoico.	Detector de moléculas (Sensor luminiscente).	Pueden exhibir fluorescencia, fosforescencia o respuesta lumínica según sea su entorno, este GMO, presenta una emisión roja intensa en presencia de compuestos nitroaromáticos, por lo que puede ser utilizado como sensor óptico de explosivos (Tharra & Baire, 2017).
Sistema formado por Zn(II) y como ligante el imidazolato.	Liberación controlada de fármacos.	Por su naturaleza blanda, porosidad y respuesta a distintos estímulos como pH, luz, temperatura, los GMOs pueden ser utilizados en la liberación controlada, este sistema permitió la liberación de ibuprofeno de forma sostenida durante 72 horas, evitando picos de concentración, lo que permite una administración localizada (Shang y col., 2019).
Sistema formado por Fe(III) y como ligante el 2-metilimidazolato.	Remoción de contaminantes.	Puede usarse para el tratamiento de aguas contaminadas y la remediación ambiental. Ya que este compuesto es capaz de adsorber contaminantes orgánicos como azul de metileno en agua (Zhao y col., 2020).
Sistema formado por Co(II) y como ligante el ácido tereftálico.	Dispositivos electroquímicos y almacenamiento de energía.	Material usado para supercapacitores, debido a que presentan una conductividad iónica y/o electrónica. Tiene una estructura tridimensional que promueve la conducción empleándolo como electrodo con buena estabilidad y capacidad de almacenamiento de carga (Shao y col., 2018).
Sistema formado por Cu(II) y como ligante la piridina.	Materiales inteligentes (autocurativos).	Este GMO responde a variaciones de pH restaurando su estructura después de haber recibido daño, lo que lo vuelve útil en la aplicación de materiales inteligentes (Roy y col., 2022).

CONCLUSIONES

Los geles metal orgánicos (GMO) se presentan como una variante emergente de materiales híbridos que combinan la gran versatilidad de los compuestos de coordinación (PC y MOF) con la funcionalidad de los geles. Dicha estructura (1D, 2D y 3D), basada en interacciones de coordinación reversibles y redes supramoleculares, les confiere una notable estabilidad, capacidad de respuesta a estímulos externos y en ocasiones porosidad; lo que los vuelve de gran interés científico y tecnológico.

A lo largo de la última década, el diseño racional de GMO mediante la selección estratégica de metales y ligantes ha permitido modular las propiedades mecánicas, luminiscentes, ópticas y de autocuración, estableciendo una clara relación entre estructura y función. Asimismo, los avances en métodos de síntesis, caracterización reológica y estudios espectroscópicos han contribuido significativamente a comprender los mecanismos de autoensamblaje, el comportamiento viscoelástico y los procesos de autorreparación asociados a las interacciones dinámicas metal-ligante.

Como resultado, los GMO han demostrado un amplio potencial en aplicaciones prácticas como catálisis, sensores ópticos, captura de gases, liberación controlada de fármacos, tratamiento de aguas, almacenamiento de energía, por mencionar algunas. No obstante, persisten desafíos importantes, entre ellos, el control preciso de la arquitectura supramolecular, la mejora de la estabilidad a largo plazo, la escalabilidad de los procesos de síntesis y su integración en dispositivos funcionales.

En perspectiva, el desarrollo de estrategias sintéticas más sostenibles, el diseño de sistemas multifuncionales y la comprensión profunda de las interacciones dinámicas en estos materiales serán determinantes para consolidar a los GMO como plataformas tecnológicas versátiles en aplicaciones avanzadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación, a través del Programa “Investigadoras e Investigadores COMECyT 2025”, folio CAT2024-0006. Además del financiamiento otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Adarsh, N. N., & Dastidar, P. (2011). A New Series of Zn II Coordination Polymer Based Metallogels Derived from Bis-pyridyl-bis-amide Ligands: A Crystal Engineering Approach. *Crystal Growth & Design*, 11: 328–336. DOI: <https://doi.org/10.1021/cg101342g>
- Batabyal, S. K., Leong, W. L., & Vittal, J. J. (2010). Fluorescent Coordination Polymeric Gel from Tartaric Acid-Assisted Self-Assembly. *Langmuir*, 26: 7464–7468. DOI: <https://doi.org/10.1021/la904185c>
- Cao, W., Lin, Z., Zheng, D., Zhang, J., Heng, W., Wei, Y., Gao, Y., & Qian, S. (2023). Metal–organic gels: recent advances in their classification, characterization, and application in the pharmaceutical field. *Journal of Materials Chemistry B*, 11: 10566–10594. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3TB01612A>
- Cao, Z., Jiang, Z., Li, Y., Huang, C., & Li, Y. (2019). Metal–Organic Gel-Derived Multimetal Oxides as Effective Electrocatalysts for the Oxygen Evolution Reaction. *ChemSusChem*, 12: 2480–2486. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201900194>
- Dhibar, S., Dey, A., Ghosh, D., Majumdar, S., Dey, A., Ray, P. P., & Dey, B. (2020). Triethylenetetramine-Based Semiconducting Fe(III) Metallogel: Effective Catalyst for Aryl–S Coupling. *ACS Omega*, 5: 2680–2689. <https://doi.org/10.1021/acs.omega.9b03194>
- Feldner, T., Häring, M., Saha, S., Esquena, J., Banerjee, R., & Díaz, D. D. (2016). Supramolecular Metallogel That Imparts Self-Healing Properties to Other Gel Networks. *Chemistry of Materials*, 28: 3210–3217. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b01144>

- Häring, M., & Díaz, D. D. (2016). Supramolecular metallogels with bulk self-healing properties prepared by in situ metal complexation. *Chemical Communications*, 52: 13068–13081. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6CC06533C>
- Husain, A., Parveen, R., & Dastidar, P. (2015). New Series of Zn II /Cd II Mixed Ligand Coordination Polymers: Toward the Design of Metallogels. *Crystal Growth & Design*, 15: 5075–5085. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b01044>
- Iranifam, M. (2024). MOFs-, COFs- and MOGs-assisted chemiluminescence methods. *Microchemical Journal*, 199: 110096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110096>
- Lam, S.-T., Wang, G., & Yam, V. W.-W. (2008). Luminescent Metallogels of Alkynylrhodium(II) Tricarbonyl Diimine Complexes. *Organometallics*, 27: 4545–4548. DOI: <https://doi.org/10.1021/om800610x>
- Lee, H., Kang, S., Lee, J. Y., & Jung, J. H. (2012). Coordination polymer gel derived from a tetrazole ligand and Zn²⁺: spectroscopic and mechanical properties of an amorphous coordination polymer gel. *Soft Matter*, 8: 2950. DOI: <https://doi.org/10.1039/c2sm07231a>
- Li, C., Zhang, X., Li, Y., & Meng, Z. (2025). Ligand competition strategy-induced metal-organic gel MOG-808 for the detection and removal of Cr(VI) from celery juice. *Food Chemistry*, 495: 146445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146445>
- Liu, G., Li, S., Shi, C., Huo, M., & Lin, Y. (2023). Progress in Research and Application of Metal–Organic Gels: A Review. *Nanomaterials*, 13: 1178. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13071178>
- Ma, S., Xu, J., Sohrabi, S., & Zhang, J. (2023). Metal–organic gels and their derived materials for electrochemical applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 11: 11572–11606. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3TA01221B>
- Martínez, M., Kotova, O., Möbius, M. E., Bell, A. P., McCabe, T., Boland, J. J., & Gunnlaugsson, T. (2015). Healable Luminescent Self-Assembly Supramolecular Metallogels Possessing Lanthanide (Eu/Tb) Dependent Rheological and Morphological Properties. *Journal of the American Chemical Society*, 137: 1983–1992. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja511799n>
- Marzabad, M. A., Chattopadhyay, S., Hietala, S., Nonappa, N., Marek, R., & Jurček, O. (2025). Robust Self-Healing Metallo-Supergels of Folic Acid: Potential Sustainable Gelator for Oilfield Applications. *Chemistry – A European Journal*, 31: 202500748. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.202500748>
- Miklaszewska, P., & Wagner-Wysiecka, E. (2025). The color code: MOFs unlocking new horizons in chemical sensing. *Applied Materials Today*, 47: 102966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102966>

- Qiu, J., Hajibabaei, H., Nellist, M. R., Laskowski, F. A. L., Hamann, T. W., & Boettcher, S. W. (2017). Direct in Situ Measurement of Charge Transfer Processes During Photoelectrochemical Water Oxidation on Catalyzed Hematite. *ACS Central Science*, 3: 1015–1025. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00310>
- Rajamalli, P., & Prasad, E. (2011). Low Molecular Weight Fluorescent Organogel for Fluoride Ion Detection. *Organic Letters*, 13: 3714–3717. DOI: <https://doi.org/10.1021/ol201325j>
- Roy, M., Adhikary, A., Saha, S., & Mondal, R. (2022). Toxic metal–organic gels using a unique pyridine–pyrazole based ligand with Pb(II), Cd(II) and Hg(II) salts: multi-stimuli responsiveness and toxic dye adsorption. *Materials Advances*, 3: 7328–7338. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2MA00483F>
- Roy, S., Katiyar, A. K., Mondal, S. P., Ray, S. K., & Biradha, K. (2014). Multifunctional White-Light-Emitting Metal–Organic Gels with a Sensing Ability of Nitrobenzene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6: 11493–11501. DOI: <https://doi.org/10.1021/am502146m>
- Shaiful Bahari, A. M., Othman, S. Z., Mohamad Fadli, M. F., Zulkifli, M. Z. A., Biyamin, S. A., Islam, M. A., Aspanut, Z., Amin, N., & Misran, H. (2021). Facile synthesis of Zr-based metal-organic gel (Zr-MOG) using “green” sol-gel approach. *Surfaces and Interfaces*, 27: 101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101469>
- Shang, S., Yuan, B., Sun, Y., Chen, G., Huang, C., Yu, B., He, S., Dai, H., & Chen, X. (2019). Facile preparation of layered melamine-phytate flame retardant via supramolecular self-assembly technology. *Journal of Colloid and Interface Science*, 553: 364–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.015>
- Shao, J., Jiang, T., Tang, W., Chen, X., Xu, L., & Wang, Z. L. (2018). Structural figure-of-merits of triboelectric nanogenerators at powering loads. *Nano Energy*, 51: 688–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.07.032>
- Sharma, N., Sharma, P. K., Singh, Y., & Nagaraja, C. M. (2019). A Self-Healing Metal–Organic Gel (MOG) Exhibiting pH-Responsive Release of a Chemotherapeutic Agent, Doxorubicin: Modulation of Release Kinetics by Partial Dehydration of Matrix. *ACS Omega*, 4: 1354–1363. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02833>
- Sutar, P., & Maji, T. K. (2016). Coordination polymer gels: soft metal–organic supramolecular materials and versatile applications. *Chemical Communications*, 52: 8055–8074. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6CC01955B>
- Terech, P., Yan, M., Maréchal, M., Royal, G., Galvez, J., & Velu, S. K. P. (2013). Characterization of strain recovery and “self-healing” in a self-assembled metallo-gel. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15: 7338. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3cp50671a>

- Tharra, P., & Baire, B. (2017). Unconventional Reactivity of (Z)-Enoate Propargylic Alcohols in the Presence of Acids. *Chemistry – A European Journal*, 23: 2014–2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.201605654>
- Xie, Z., Sun, P., Wang, Z., Li, H., Yu, L., Sun, D., Chen, M., Bi, Y., Xin, X., & Hao, J. (2020). Metal–Organic Gels from Silver Nanoclusters with Aggregation-Induced Emission and Fluorescence-to-Phosphorescence Switching. *Angewandte Chemie International Edition*, 59: 9922–9927. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201912201>
- Zhang, B., Dong, X., Xiong, Y., Zhou, Q., Lu, S., Liao, Y., Yang, Y., & Wang, H. (2020). A heat-set lanthanide metallogel capable of emitting stable luminescence under thermal, mechanical and water stimuli. *Dalton Transactions*, 49: 2827–2832. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9DT04713A>
- Zhang, J., Hu, Y., & Li, Y. (2018). Chapter Three – Gel Chemistry. Carpenter B., Ceroni P., Kirchner B., Landfester K., Leszczynski J., Luh T., Perlt E. & Polfer N. (Eds.), *Metal–Organic Gels* (pp. 61–118). Singapore: Springer Nature. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6881-2_3
- Zhang, Q., Tang, D., Zhang, J., Ni, R., Xu, L., He, T., Lin, X., Li, X., Qiu, H., Yin, S., & Stang, P. J. (2019). Self-Healing Heterometallic Supramolecular Polymers Constructed by Hierarchical Assembly of Triply Orthogonal Interactions with Tunable Photophysical Properties. *Journal of the American Chemical Society*, 141: 17909–17917. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.9b09671>
- Zhao, H., Jiang, Y., Liu, H., Long, Y., Wang, Z., & Hou, Z. (2020). Direct synthesis of allyl alcohol from glycerol over CoFe alloy. *Applied Catalysis B: Environmental*, 277: 119187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119187>
- Zhao, H., Shi, Q., Xiao, H., & Li, X. (2014). Supramolecular approach to metal–organic gels using excess organic ligand as building units. *Journal of Porous Materials*, 21: 691–697. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10934-014-9816-5>
- Zhuang, Z., Mai, Z., Wang, T., & Liu, D. (2020). Strategies for conversion between metal–organic frameworks and gels. *Coordination Chemistry Reviews*, 421: 213461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213461>