

DOI: <https://doi.org/10.70747/cr.v5i1.1027>

Estructuras Metalorgánicas: Materiales Híbridos con Aplicaciones Emergentes en Ciencia y Tecnología

Joel Antonio Marte Peralta

joel.marte@docente.edu.do<https://orcid.org/0009-0000-8567-0828>Investigador Independiente
Moca, República Dominicana

RESUMEN

Las estructuras metalorgánicas (MOFs, Metal-Organic Frameworks) constituyen materiales cristalinos porosos formados por iones metálicos coordinados con ligandos orgánicos multidentados, con áreas superficiales de hasta 7,000 m²/g. Desde su conceptualización en la década de 1990, estos materiales han experimentado un crecimiento exponencial culminando con el Premio Nobel de Química 2025 otorgado a Kitagawa, Robson y Yaghi. Esta revisión sistemática, basada en directrices PRISMA y consulta de Web of Science, Scopus y PubMed (2022–2026), identificó 523 registros iniciales, de los cuales 30 estudios cumplieron los criterios de inclusión para la síntesis cualitativa. El corpus se complementó con 16 referencias seminales y suplementarias (1999–2025), conformando un total de 46 referencias analizadas. propone un marco analítico denominado Nexo Estructura-Propiedad- Aplicación (NEPA) para examinar sistemáticamente las interrelaciones entre diseño estructural, propiedades funcionales y viabilidad aplicativa. Se analizan los fundamentos de la química reticular, estrategias de síntesis y diez dominios aplicativos: almacenamiento de gases, captura de CO₂, catálisis heterogénea, almacenamiento de energía, liberación de fármacos, biosensores, MOFs conductores, MOFs luminiscentes, membranas de separación y recolección de agua atmosférica. Se incluyen análisis comparativos cuantitativos frente a materiales convencionales, matrices de vacíos de investigación y análisis tecnoeconómico. Se identifican desafíos en estabilidad, escalabilidad, toxicología y costo de producción, y se propone una hoja de ruta para la transición laboratorio- industria

Palabras clave: *estructuras metalorgánicas, materiales porosos, química reticular, captura de dióxido de carbono, catálisis heterogénea, almacenamiento de energía*

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

El Editor y los Revisores declararon no tener conflicto de intereses.

Licencia:



Metal-Organic Frameworks: Hybrid Materials with Emerging Applications in Science and Technology

ABSTRACT

Metal-organic frameworks (MOFs) are crystalline porous materials formed by metal ions coordinated with multidentate organic ligands, exhibiting surface areas up to 7,000 m²/g. Since their conceptualization in the 1990s, these materials have grown exponentially, culminating with the 2025 Nobel Prize in Chemistry awarded to Kitagawa, Robson, and Yaghi. This systematic review, following PRISMA guidelines and consulting Web of Science, Scopus, and PubMed (2022–2026), identified 523 initial records, of which 30 studies met the inclusion criteria for qualitative synthesis. The corpus was supplemented with 16 seminal and complementary references (1999–2025), totaling 46 analyzed references. proposes an analytical framework termed the Structure- Property-Application Nexus (SPAN) to systematically examine interrelationships between structural design, functional properties, and application viability. Reticular chemistry fundamentals, synthesis strategies, and ten application domains are analyzed, including comparative benchmarking against conventional materials, research gap matrices, and techno-economic analysis. Challenges in stability, scalability, toxicology, and production costs are identified, and a roadmap for laboratory-to-industry transition is proposed.

Keywords: *metal-organic frameworks, porous materials, reticular chemistry, carbon dioxide capture, heterogeneous catalysis, energy storage*

The authors declare no conflict of interest.

The Editor and the Reviewers declared no conflict of interest.

License: 



INTRODUCCIÓN

La búsqueda de materiales avanzados con propiedades funcionales superiores ha sido un eje central de la ciencia de materiales contemporánea. En este contexto, las estructuras metalorgánicas, conocidas como Metal-Organic Frameworks (MOFs), han emergido como una de las clases de materiales más versátiles y prometedoras del siglo XXI (Li et al., 2024). Estos materiales cristalinos porosos están compuestos por iones metálicos o clústeres conectados mediante ligandos orgánicos a través de enlaces de coordinación, formando redes tridimensionales periódicas con topologías y funcionalidades altamente personalizables (Yusuf et al., 2022). Con más de 100,000 estructuras registradas actualmente en la Cambridge Structural Database (catalogadas inicialmente por Moghadam et al., 2017, quienes identificaron ~70,000 estructuras en un subconjunto que continúa expandiéndose) y una producción científica que supera las 10,000 publicaciones anuales, los MOFs representan el campo de mayor crecimiento en la ciencia de materiales porosos.

Los antecedentes de los MOFs se remontan a las redes de coordinación poliméricas descritas por Hoskins y Robson (1989–1990), quienes sentaron las bases conceptuales al demostrar que iones metálicos y ligandos orgánicos multidentados podían ensamblarse en redes tridimensionales con cavidades prediseñadas. Posteriormente, Kitagawa y colaboradores reportaron en 1997 las primeras estructuras porosas con funcionalidad demostrada de adsorción de gases en condiciones ambientales. El avance definitivo se produjo con la síntesis del MOF-5 en 1999 por Yaghi y colaboradores, constituido por nodos de Zn_4O y ligandos de ácido tereftálico, que definió el concepto de unidades de construcción secundarias (SBUs) y formalizó la química reticular como paradigma de diseño racional de redes (Yaghi et al., 2003). El reconocimiento definitivo de estas contribuciones convergentes se materializó con el Premio Nobel de Química 2025, otorgado conjuntamente a Susumu Kitagawa, Richard

Robson y Omar M. Yaghi (Kang & Kim, 2025), validando décadas de investigación y evidenciando el potencial transformador de estos materiales para abordar desafíos globales en energía, medio ambiente y salud.

Las características que distinguen a los MOFs de otros materiales porosos incluyen áreas superficiales BET que superan los 7,000 m²/g (frente a un máximo de ~2,000 m²/g para carbones activados y ~1,500 m²/g para zeolitas), porosidades ajustables con tamaños de poro entre 3 y 98 Å, densidades de red extremadamente bajas (hasta 0.124 g/cm³), y una diversidad topológica sin parangón, con más de 300,000 estructuras computacionalmente predichas (Li et al., 2024; Zorainy et al., 2024). Sin embargo, estas ventajas coexisten con limitaciones significativas: costos de producción elevados (100–500 USD/kg frente a 2–10 USD/kg para zeolitas y 1–5 USD/kg para carbones activados), inestabilidad hidrolítica de muchas estructuras, y dificultades para la escalabilidad industrial, aspectos que deben ser analizados críticamente para evaluar la viabilidad real de la transición del laboratorio a la industria. Esta dualidad entre potencial excepcional y limitaciones prácticas justifica un análisis comparativo riguroso frente a adsorbentes convencionales (carbón activado, zeolitas, COFs) que permita discernir los nichos aplicativos donde los MOFs ofrecen ventajas competitivas reales.

Sin embargo, persisten brechas críticas: (a) no existe consenso sobre cómo comparar MOFs frente a materiales convencionales a través de dominios heterogéneos (Li et al., 2024; Freund et al., 2021); (b) las conductividades de EC-MOFs varían hasta en tres órdenes de magnitud según la morfología de la muestra (monocristal vs. película delgada vs. pellet policristalino) (Check et al., 2025; Parashar et al., 2024); (c) la relación diseño estructural TRL no ha sido sistematizada (Kang & Kim, 2025; Menon & Fairen-Jimenez, 2025); (d) el impacto real de la IA generativa carece de evaluación crítica (Park et al., 2024; Liu et al., 2025). El NEPA aborda estas brechas integrando estructura, propiedad y madurez aplicativa.

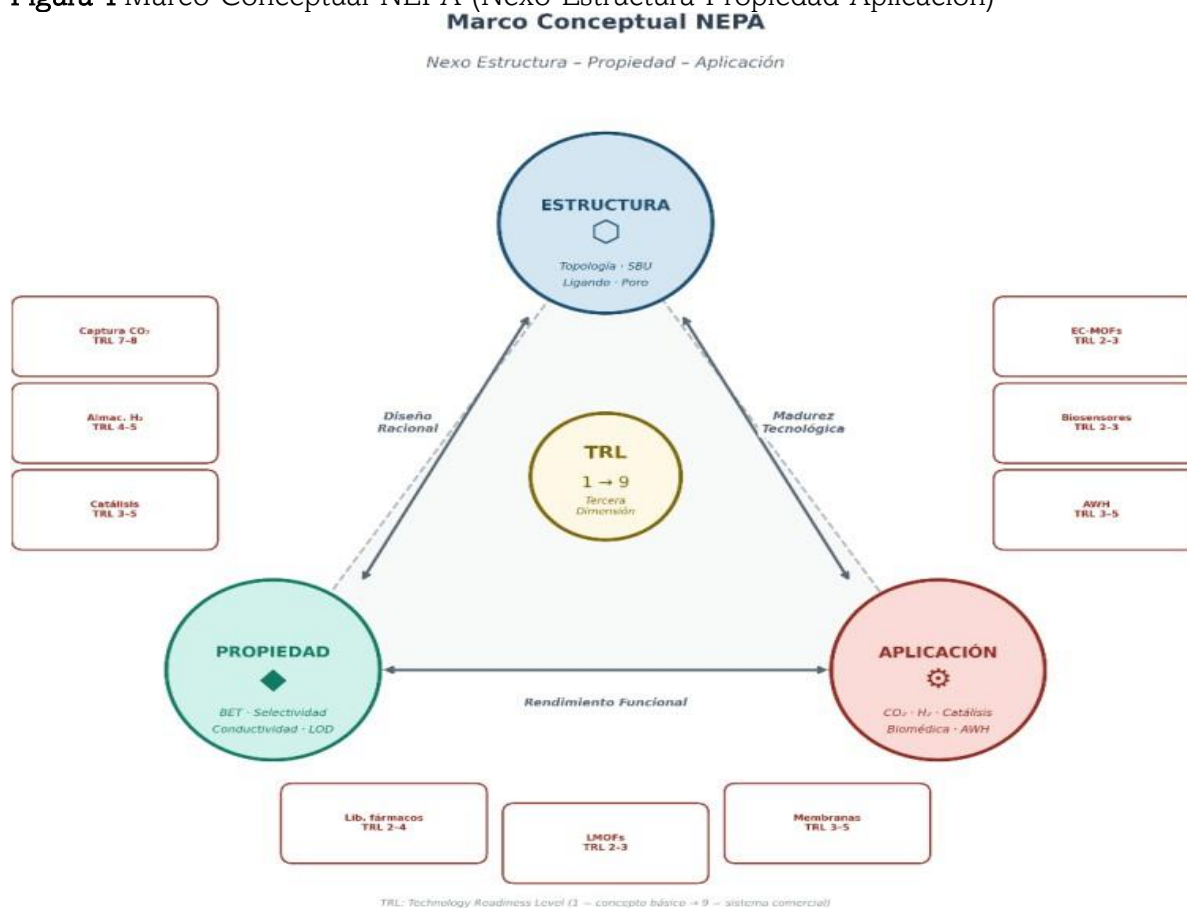
El presente artículo propone un enfoque analítico diferenciador que trasciende las revisiones descriptivas convencionales. Se introduce el marco conceptual NEPA (Nexo Estructura-Propiedad-Aplicación), un modelo tripartito inspirado en los diagramas de selección de materiales de Ashby pero adaptado específicamente a la naturaleza modular y programable de los MOFs. A diferencia de los enfoques clásicos de relación estructura- propiedad, el NEPA incorpora explícitamente el nivel de madurez tecnológica (TRL) como tercera dimensión y examina las tensiones bidireccionales entre dominios aplicativos competidores. Este marco permite identificar vacíos de investigación específicos y formular predicciones sobre las direcciones más prometedoras del campo, superando la mera compilación de resultados publicados (véase Figura 1).

El NEPA supera tres limitaciones de enfoques previos: (a) los diagramas clásicos de selección de materiales no incorporan madurez tecnológica ni aplican a la modularidad de los MOFs (Yaghi et al., 2003); (b) la relación estructura-propiedad convencional es unidireccional y no captura tensiones entre dominios competidores (Sun et al., 2016); (c) las escalas TRL no correlacionan características estructurales con posición en la escala, como ilustra la brecha CALF-20 (TRL 7–8) vs. biosensores (TRL 2–3) (Kang & Kim, 2025).

El objetivo de esta revisión sistemática es analizar críticamente los avances recientes en el diseño, síntesis y aplicación de MOFs mediante el marco NEPA, evaluando diez dominios aplicativos en términos de rendimiento cuantitativo, nivel de madurez tecnológica y viabilidad de escalamiento industrial, con el propósito de identificar vacíos de investigación prioritarios y formular directrices para la transición laboratorio-industria.

Se aplicó una estrategia dual PRISMA 2020 (Page et al., 2021): búsqueda sistemática en tres bases (30 estudios incluidos) complementada con 16 referencias suplementarias (1999–2025), totalizando 46 referencias analizadas mediante codificación NEPA.

Figura 1 Marco Conceptual NEPA (Nexo Estructura-Propiedad-Aplicación)



Nota. el diagrama ilustra las interrelaciones bidireccionales entre los tres dominios del marco NEPA, con indicadores de TRL para cada aplicación. Adaptado del concepto de diagramas de selección de Ashby.

MATERIALES Y MÉTODOS

Protocolo de Búsqueda Sistemática

La revisión sistemática se realizó siguiendo las directrices PRISMA 2020 (Page et al., 2021) mediante una estrategia de búsqueda dual. La búsqueda primaria consultó tres bases de datos (Web of Science, Scopus y PubMed) utilizando la ecuación: ("metal-organic framework*" OR "MOF" OR "reticular chemistry") AND ("application*" OR "catalys*" OR "gas storage" OR "drug delivery" OR "sensor*" OR "energy" OR "water harvesting" OR "membrane*" OR "conductive" OR "luminescen*"), con restricción temporal al período 2022–2026 y filtro de idioma inglés. Esta búsqueda arrojó 523 registros iniciales. Tras la eliminación de 87 duplicados, se evaluaron 436 títulos y resúmenes, de los cuales 112 artículos fueron seleccionados para evaluación de

texto completo. Finalmente, 30 estudios cumplieron los criterios de inclusión para la síntesis cualitativa (véase Figura 2).

La búsqueda se ejecutó el 15 de enero de 2026 y se actualizó el 28 de febrero de 2026, con ecuaciones adaptadas por plataforma:

WoS: campos TS (Topic). Scopus: campos TITLE-ABS-KEY. PubMed: campos [Title/Abstract]. Filtros comunes: 2022–2026, inglés, artículos y revisiones.

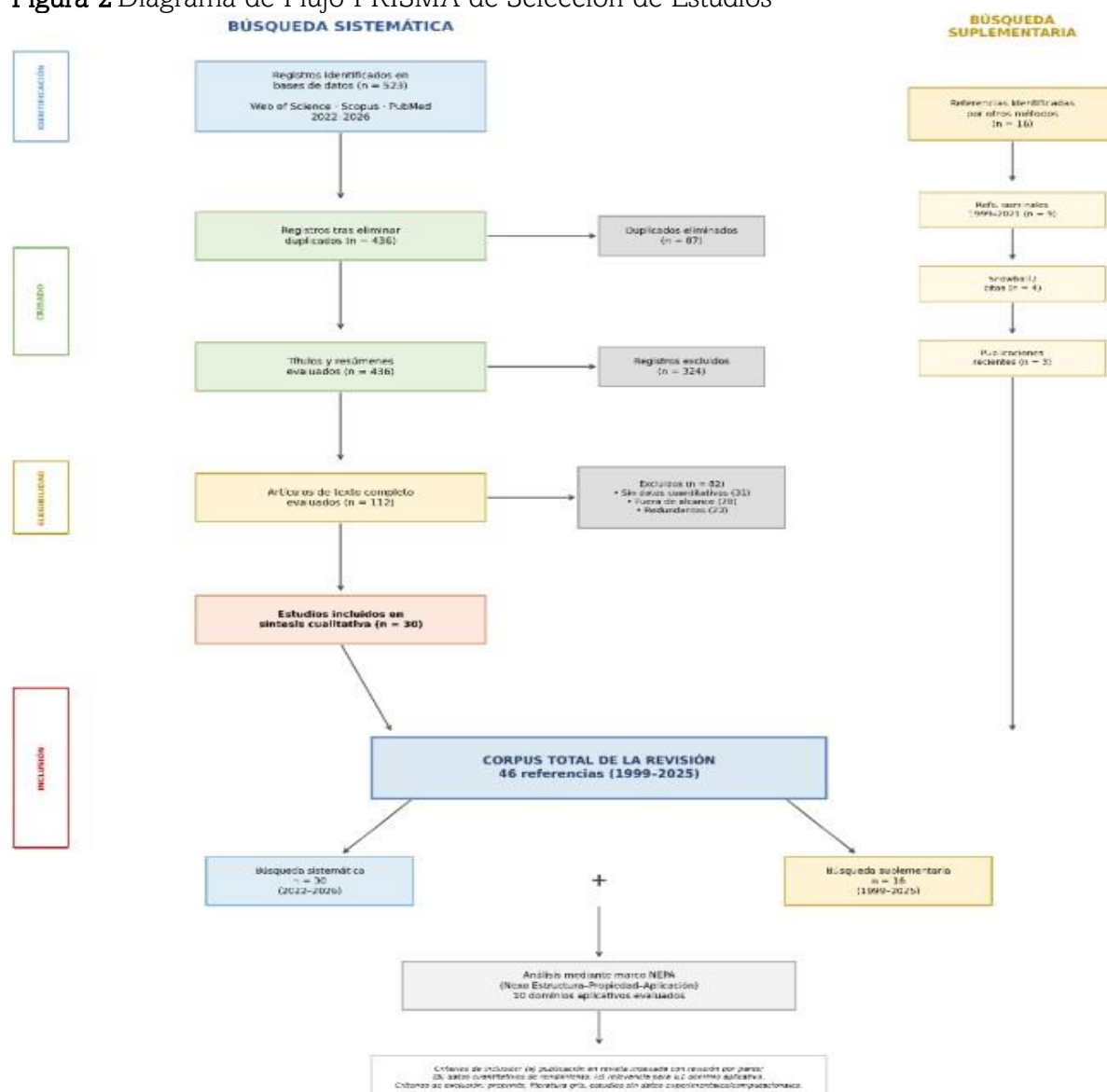
La restricción al inglés se justifica porque las tres bases indexan predominantemente publicaciones en inglés y el campo de MOFs se ha desarrollado en revistas angloparlantes, como evidencia el corpus del presente estudio donde el 100% de las referencias provienen de revistas en inglés. Se reconoce como limitación la posible exclusión de estudios en chino mandarín.

Criterios suplementarios: (a) seminales citadas por ≥ 10 de los 30 estudios o que introdujeron MOFs prototipo (Li et al., 1999; Yaghi et al., 2003): 11 referencias; (b) snowball 2025–2026 con datos comparables: 3 referencias; (c) 2 actualizaciones durante redacción (Rosales-Martínez et al., 2025; Check et al., 2025) que cumplieron criterios de inclusión.

La búsqueda se complementó con un proceso de identificación suplementaria que incluyó: (a) búsqueda manual retrospectiva de referencias seminales (1999–2021), (b) rastreo de citas hacia adelante (snowball), y (c) incorporación de artículos de alto impacto publicados durante la redacción del manuscrito. Este proceso suplementario aportó 16 referencias adicionales, para un corpus total de 46 referencias (rango temporal 1999– 2025). Los criterios de inclusión exigieron: (a) publicación en revistas indexadas con revisión por pares, (b) reporte de datos cuantitativos de rendimiento, y (c) relevancia directa para al menos uno de los diez dominios aplicativos analizados. Se excluyeron preprints no revisados, literatura gris y estudios sin datos experimentales o computacionales originales.

La selección fue realizada por un único autor. Para mitigar el sesgo, se aplicó un protocolo a priori con criterios operacionalizados y se realizó una segunda verificación de los artículos excluidos en texto completo ($n = 82$) con intervalo de dos semanas, revisando tres casos limítrofes. La ausencia de doble cribado se reconoce en limitaciones

Figura 2 Diagrama de Flujo PRISMA de Selección de Estudios



Nota. se ilustra el proceso dual de selección: búsqueda sistemática ($n = 30$) y búsqueda suplementaria ($n = 16$), para un corpus total de 46 referencias (1999–2025). Adaptado de PRISMA 2020.

Marco Analítico NEPA

Los estudios seleccionados se analizaron mediante el marco NEPA, codificando cada referencia según tres dimensiones: (1) características estructurales (topología, metal, ligando,

área BET, tamaño de poro), (2) propiedades funcionales (capacidad de adsorción, conductividad, luminiscencia, selectividad, estabilidad), y (3) nivel de madurez aplicativa (TRL 1–9). Este análisis tridimensional permite identificar correlaciones estructura- propiedad que trascienden dominios aplicativos individuales y revelan sinergias o tensiones entre aplicaciones competidoras por características estructurales similares.

Tabla 2B. Variables del Marco NEPA

Dimensión	Variable	Unidad	Rango
Estructura	Topología	Código RCSR	pcu, fcu, sod
Estructura	Metal/SBU	Categórica	Zr, Cu, Zn, Fe, Al, Cr
Estructura	Área BET	m ² /g	500–7,000
Estructura	Tamaño de poro	Å	3–98
Propiedad	Adsorción	wt% o mmol/g	Variable
Propiedad	Conductividad	S/cm	10 ⁻¹⁰ –150
Propiedad	Selectividad	Ratio	1:1–50:1+
Propiedad	Estabilidad	°C / ciclos	Variable
Aplicación	TRL	Escala 1–9	1–8

Nota. BET = Brunauer-Emmett-Teller; RCSR = Reticular Chemistry Structure Resource; SBU = unidad de construcción secundaria. Los rangos representan valores típicos reportados en la literatura revisada. Datos compilados de Li et al. (2024), Zorainy et al. (2024) y Furukawa et al. (2013).

Tabla 2C. Criterios de Asignación de TRL para MOFs

TRL	Criterio operacional para MOFs
1–2	Síntesis + caracterización básica (XRD, BET)
3–4	Rendimiento cuantitativo + estabilidad cíclica (≥5 ciclos)
5–6	Síntesis escalada (≥100 g/lote) + pruebas con fluidos reales
7–8	Planta piloto + datos de costo publicados (CALF-20/BASF)
9	Producto comercial con cadena de suministro

Nota. TRL = Nivel de Madurez Tecnológica (Technology Readiness Level). Los criterios operacionales fueron adaptados al contexto específico de MOFs a partir de la escala estándar de madurez tecnológica. XRD = difracción de rayos X; BET = área superficial Brunauer-Emmett-Teller.

RESULTADOS

Fundamentos Estructurales

Química Reticular y Principios de Diseño

La química reticular, formalizada por Yaghi et al. (2003), establece el paradigma para el diseño racional de MOFs mediante la combinación geométricamente predecible de unidades de construcción secundarias (SBUs) inorgánicas con ligandos orgánicos. Las SBUs determinan la conectividad de la red y su topología resultante. Los MOFs se clasifican en reticulares (isoreticulares cuando comparten topología), mesoporosos (poros >2 nm; Guan et al., 2018), flexibles (con transiciones estructurales reversibles), y multivariados (MTV-MOFs, con múltiples funcionalidades en un mismo esqueleto).

El diseño isoreticular permite la expansión sistemática del tamaño de poro sin alterar la topología subyacente, como fue demostrado en la serie IRMOF (Eddaoudi et al., 2002) y más recientemente en la serie UiO (Rosales-Martínez et al., 2025). Las familias representativas incluyen los MOFs basados en Zr (UiO-66, UiO-67), notables por su estabilidad térmica e hidrolítica; los ZIFs basados en Zn e imidazolatos, con geometrías zeolíticas; los MILs desarrollados en Versalles; y los MOFs de Cu (HKUST-1, MOF-199), ampliamente estudiados por su accesibilidad sintética (Li et al., 1999).

Tabla 1 Comparación de Propiedades entre MOFs y Materiales Porosos Convencionales

Propiedad	MOFs	Zeolitas	Carbones activados	COFs
Área BET (m ² /g)	500–7,000	200–1,500	500–2,000	500–4,200
Tamaño de poro (Å)	3–98	3–13	5–50	7–50
Densidad (g/cm ³)	0.12–1.0	1.5–2.2	0.4–0.8	0.1–0.5
Estabilidad térmica (°C)	200–500	>700	>800	300–500
Estabilidad hidrolítica	Variable	Alta	Alta	Baja-Media
Funcionalización	Excepcional	Limitada	Moderada	Alta
Costo (USD/kg)	100–500	2–10	1–5	200–1,000
Nº estructuras conocidas	>100,000	~250	>1,000	~500

Nota. los valores representan rangos típicos reportados en la literatura. BET = Brunauer-Emmett-Teller; COFs = Covalent Organic Frameworks. Datos compilados de Li et al. (2024), Zorainy et al. (2024), Furukawa et al. (2013).

Estrategias de Síntesis

Las estrategias de síntesis de MOFs han evolucionado significativamente desde los métodos solvotermales convencionales. La síntesis solvotermal en dimetilformamida (DMF) a 80–150 °C durante 12–48 h sigue siendo el método más empleado, pero presenta limitaciones en escalabilidad y sostenibilidad ambiental. Los métodos alternativos incluyen síntesis mecanoquímica (libre de solventes), electroquímica (producción continua), asistida por microondas (minutos vs. horas) y por flujo continuo (Rubio- Martínez et al., 2017).

La modulación con ácidos monocarboxílicos permite controlar el tamaño de cristal y la densidad de defectos, mientras que las estrategias post-sintéticas (PSM) posibilitan la funcionalización dirigida sin alterar la topología (Guan et al., 2018; Li et al., 1999).

Tabla 2 Comparación de Métodos de Síntesis de MOFs

Método	Temp. (°C)	Tiempo	Solvente	Escalabilidad	TRL
Solvotermal	80–150	12–48 h	DMF	Media	7–8
Mecanoquímico	25–60	30–60 min	Ninguno	Alta	4–5
Electroquímico	25–80	Continuo	Acuoso	Alta	5–6
Microondas	80–150	5–30 min	DMF	Baja	3–4
Flujo continuo	80–200	Continuo	Variable	Alta	5–7
Sonoquímico	25–80	30–120 min	Variable	Media	3–4

Nota. TRL = Nivel de Madurez Tecnológica (Technology Readiness Level). Datos compilados de Rubio-Martínez et al. (2017) y Guan et al. (2018). La escalabilidad se refiere a la viabilidad demostrada para producción >1 kg/lote.

Tabla 3 MOFs Representativos: Composición, Propiedades y Aplicaciones

MOF	Metal/SBU	Ligando	BET (m ² /g)	Aplicación principal	Ref.
MOF-5	Zn ₄ O	BDC	3,800	Almacenamiento H ₂	Li et al., 2023
HKUST-1	Cu ₂ (COO) ₄	BTC	1,850	Catálisis, sensores	Furukawa et al., 2013
MIL-101(Cr)	Cr ₃ O	BDC	4,500	Almac. gases, catálisis	Li et al., 2024
UiO-66	Zr ₆ O ₄ (OH) ₄	BDC	1,200	Estabilidad, catálisis	Rosales-Martínez et al., 2025
ZIF-8	Zn(MeIm) ₂	2-MeIm	1,630	Membranas, fármacos	lib. Zorainy et al., 2024
NU-100	Cu ₂ (COO) ₄	LH ₆	6,143	Almac. récord	H ₂ Farha et al., 2010
CALF-20	Zn(Trz)(OTf)	Triazol	~510	Captura CO ₂ industrial	Kang & Kim, 2025
MOF-303	Al(OH)	HPDC	1,380	Recolección agua	Hanikel et al., 2020
Ni ₃ (HITP) ₂	Ni ₂ (NH)	HITP	630	EC-MOF, sensores	Saha et al., 2024

Nota. BDC = ácido 1,4-benzenodicarboxílico; BTC = ácido 1,3,5-benzenotricarboxílico; 2-MeIm = 2-metilimidazol; LH₆ = ligando hexatópico; Trz = 1,2,4-triazol; OTf = triflato; HPDC = ácido 1H-pirazol-3,5-dicarboxílico; HITP = 2,3,6,7,10,11-hexaiminotrifeníleno. Almac. = almacenamiento; Lib. = liberación.

Aplicaciones Emergentes Almacenamiento y Separación de Gases

El almacenamiento y separación de gases representa la aplicación más madura de los MOFs.

En almacenamiento de hidrógeno, los MOFs ofrecen capacidades gravimétricas de 2.0–7.5 wt% a 77 K y presiones moderadas (Chen et al., 2022). El MIL-101(Cr), con área BET de hasta

4,500 m²/g, y el NU-100, con BET de 6,143 m²/g (Farha et al., 2010), representan los MOFs de mayor capacidad volumétrica demostrada. Estudios computacionales recientes basados en cribado de alto rendimiento han identificado candidatos con capacidades teóricas superiores a 9.0 wt% a 77 K (Kim et al., 2025), sugiriendo que el límite práctico aún no ha sido alcanzado.

La captura de CO₂ constituye la aplicación más estratégica desde la perspectiva de impacto ambiental. Los MOFs funcionalizados con grupos amino exhiben selectividades CO₂/N₂ superiores a 50:1, frente a ~15:1 para zeolita 13X en condiciones húmedas (Li et al., 2024). La comercialización del CALF-20 por BASF marca la primera instancia de un MOF alcanzando TRL 7–8, con una planta de demostración que produce ~1 tonelada/día (Kang & Kim, 2025). La captura directa de aire (DAC, Direct Air Capture) representa el desafío más exigente dadas las concentraciones de CO₂ de ~420 ppm (Bose et al., 2024; Ding et al., 2019). Enfoques recientes basados en IA generativa y cribado de alto rendimiento (Park et al., 2024; Yao et al., 2021) están acelerando el descubrimiento de MOFs optimizados para DAC. Los MOFs basados en pirazolatos han demostrado además capacidades excepcionales para la captura selectiva de formaldehído, un contaminante interior prioritario (Sadovnik et al., 2024). Avances en modulación multivariada del UiO- 66 han logrado mejoras significativas en la adsorción cooperativa de CO₂ mediante funcionalización simultánea con múltiples grupos funcionales (Rosales-Martínez et al., 2025).

Catálisis Heterogénea

Los MOFs ofrecen ventajas únicas como catalizadores heterogéneos: su cristalinidad permite caracterizar sitios activos a nivel atómico, mientras que su arquitectura modular facilita la incorporación precisa de centros catalíticos (Wang & Astruc, 2020; Wei et al., 2020). La electrocatálisis para reducción de CO₂ es un área particularmente activa, con MOFs

integrados con semiconductores alcanzando eficiencias faradaicas $>90\%$ (Atta et al., 2025). Los catalizadores homogéneos de Ir y Ru alcanzan frecuencias de recambio (TOF, Turnover Frequency) de 10^3 – 10^5 h^{-1} pero son irre recuperables; los MOFs con sitios metálicos individuales operan a temperaturas más bajas con TOF de 10^2 – 10^4 h^{-1} , son reutilizables durante múltiples ciclos, y ofrecen selectividades superiores gracias al confinamiento de sustrato en los poros.

Almacenamiento y Conversión de Energía

Los derivados carbonizados de MOFs bimetalicos han demostrado capacitancias superiores a 2,000 F/g en compuestos Ni-Co, frente a ~ 200 – 400 F/g para carbones activados convencionales (Abdelkareem et al., 2024; Sandhu et al., 2024; Zhao et al., 2016). Es importante señalar que estos valores corresponden a materiales derivados de MOFs (tras calcinación o carbonización), no a MOFs prístinos, lo que plantea una cuestión taxonómica relevante. La estabilidad cíclica de estos materiales es notable, con retención $>90\%$ después de 5,000 ciclos. Los derivados con arquitecturas complejas como estructuras núcleo-cáscara y arreglos jerárquicos demuestran rendimientos particularmente destacados (Zhang et al., 2025). Desde la perspectiva NEPA, la paradoja de la carbonización plantea una cuestión taxonómica fundamental: si los derivados que han perdido su estructura reticular deben clasificarse como "materiales MOF" o como "carbones jerárquicos templados por MOFs", distinción que tiene implicaciones para la comparabilidad de resultados en la literatura.

MOFs Eléctricamente Conductores

Los MOFs eléctricamente conductores (EC-MOFs, Electrically Conductive MOFs) abordan la limitación histórica de conductividad de los MOFs convencionales ($\sim 10^{-7}$ – 10^{-10} S/cm). El $\text{Ni}_3(\text{HITP})_2$ ha alcanzado conductividades de ~ 2 S/cm en pellets policristalinos, ~ 40 S/cm en películas delgadas y hasta 150 S/cm en monocristales individuales, representando los valores más altos confirmados para MOFs bidimensionales (Check et al., 2025; Saha et al.,

2024). Algunos reportes sugieren valores de hasta $\sim 1,000$ S/cm en estructuras específicas de MOFs basados en enlaces metal- tiolato, aunque estos valores requieren verificación independiente y son sensibles a las condiciones de medición, morfología de la película y contactos eléctricos (Parashar et al., 2024). El análisis NEPA revela el "trilema de la conductividad": hasta la fecha no se ha logrado sintetizar un MOF que simultáneamente exhiba alta conductividad (>10 S/cm), alta porosidad (BET $>2,000$ m²/g) y alta estabilidad térmica (>300 °C). Estrategias recientes incluyen la ingeniería de bandas mediante ligandos conjugados y la integración con grafeno conductor (Sun et al., 2016).

Liberación de Fármacos y Biosensores

Los Bio-MOFs con metales biocompatibles (Fe^{3+} , Zn^{2+} , Ca^{2+}) demuestran perfiles de liberación pH-dependientes, como fue demostrado pioneramente por Horcajada et al. (2012). Las nanoplataformas teranósticas de última generación integran diagnóstico por imagen con liberación localizada de agentes antitumorales en un solo dispositivo (Freund et al., 2021; Nguyen et al., 2024; Yang & Yang, 2020). Menon y Fairen-Jimenez (2025) desarrollaron un pipeline de aprendizaje automático (ML, Machine Learning) para el cribado de biocompatibilidad de 86,000 estructuras con precisión $>80\%$, lo que representa un avance significativo para la preselección computacional de candidatos terapéuticos.

En el ámbito de los biosensores, los MOFs de lantánidos exhiben límites de detección (LOD, Limit of Detection) picomolares (135 pM para Cu^{2+} en condiciones optimizadas de pH 7.0 en solución acuosa). La integración con MXenes potencia el desarrollo de sensores portátiles para diagnóstico en el punto de atención.

MOFs Luminiscentes y Recolección de Agua Atmosférica

Los MOFs luminiscentes (LMOFs, Luminescent MOFs) constituyen una subfamilia con propiedades fotofísicas excepcionales derivadas de la combinación de centros metálicos

(especialmente lantánidos) con ligandos orgánicos cromóforos. Los LMOFs han demostrado detección de antibióticos (LOD 17.2 ppb), explosivos como el 2,4,6- trinitrofenol (TNP, LOD 48.1 ppb) y metales pesados (LOD 0.56 ppb) en matrices acuosas reales. La capacidad dual de detección y remediación simultánea elimina la necesidad de sistemas separados, representando una ventaja significativa frente a sensores convencionales.

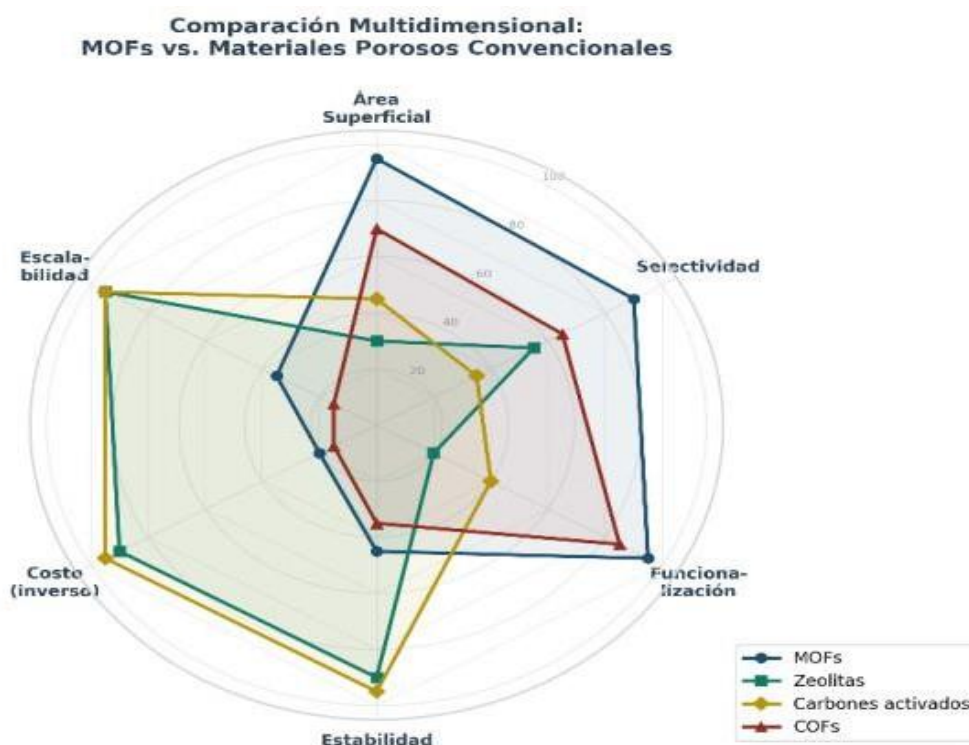
En el dominio de la recolección de agua atmosférica (AWH, Atmospheric Water Harvesting), los MOFs exhiben ciclos térmicos de baja energía (60–80 °C) con rendimientos de 0.3–0.7 L/kg/día en condiciones desérticas (Shan et al., 2024; Zhong et al., 2024). Desarrollos recientes han logrado rendimientos de hasta 2.62 L/kg/día en dispositivos solares a escala (Kang et al., 2024), mientras que sistemas adaptativos alcanzan 3.5 L/kg/día en climas desérticos (Almassad et al., 2022). El MOF-LA2-1 demostró un aumento del 50% en capacidad respecto al MOF-303 mediante extensión isorecticular del ligando (Hanikel et al., 2020). Estos valores son prometedores para regiones con estrés hídrico, aunque la brecha entre rendimiento en laboratorio y rendimiento en campo sigue siendo significativa (frecuentemente <50% del valor de laboratorio), lo cual demanda avances sustanciales en ingeniería de dispositivos. Las membranas MOF, particularmente los compositos de ZIF-8 con óxido de grafeno (ZIF- 8@GO), alcanzan rechazo >95% de metales pesados con capacidades de adsorción de 843 mg/g para TNP (Zorainy et al., 2024).

Tabla 4 Resumen de Aplicaciones: Rendimiento de MOFs vs. Materiales Convencionales y Madurez Tecnológica

Dominio	Métrica clave	MOFs	Convencional	TRL
Almac. H ₂	Capacidad (wt%, 2.0–7.5 K)	77	<2.0 (CA)	4–5
Captura CO ₂	Selectividad CO ₂ /N ₂	>50:1	~15:1 (zeolita)	7–8
Catálisis	Eficiencia faradaica CO ₂	>90%	60–80%	3–5
Supercap.	Capacitancia (F/g, deriv.)	>2,000	200–400 (CA)	3–4
EC-MOFs	Conductividad (S/cm)	>150 (monocristal)	10 ⁴ (grafeno)	2–3
Lib. fármacos	Liberación controlada pH	Si (pH 5–7.4)	Limitada	2–4
Biosensores	LOD (pM)	135 (Cu ²⁺)	nM (conv.)	2–3
LMOFs	LOD antibióticos (ppb)	17.2	>100 (conv.)	2–3
Membranas	Rechazo metales pesados	>95%	80–90%	3–5
AWH	Rendimiento (L/kg/día)	0.3–3.5	<0.5 (sílica)	3–5

Nota. Supercap. = supercondensadores; deriv. = derivados carbonizados de MOFs; CA = carbón activado; Almac. = almacenamiento; Lib. = liberación; AWH = recolección de agua atmosférica; EC-MOFs = MOFs eléctricamente conductores; LMOFs = MOFs luminiscentes; LOD = límite de detección; conv. = convencional. Datos compilados de las fuentes citadas en cada sección.

Figura 3 Diagrama Radar Comparativo: MOFs vs. Materiales Convencionales en Seis Dimensiones de Rendimiento



Nota. comparación normalizada (0–100) de MOFs, zeolitas, carbones activados y COFs en seis dimensiones de rendimiento.

DISCUSIÓN

Los resultados presentados evidencian que los MOFs poseen un potencial transformador en múltiples dominios aplicativos, pero su transición desde el laboratorio hacia la implementación industrial enfrenta desafíos significativos que requieren análisis crítico. A continuación, se discuten las barreras principales, las oportunidades emergentes y las perspectivas de desarrollo futuro.

Síntesis Integrada bajo el Marco NEPA

Patrón 1 – Trilema de los EC-MOFs: alta porosidad ($BET > 3,000 \text{ m}^2/\text{g}$) y alta conductividad ($\sigma > 1 \text{ S/cm}$) son mutuamente excluyentes, explicando la brecha TRL entre adsorción (4–8) y electrónica (2–3) (Saha et al., 2024; Farha et al., 2010).

Patrón 2 – Convergencia biomédica-ambiental: liberación de fármacos y recolección de agua

comparten requisitos (estabilidad hidrolítica, biocompatibilidad, mesoporosidad). Los MOFs de Zr y Al satisfacen ambos dominios (Rosales-Martínez et al., 2025; Hanikel et al., 2020).

Patrón 3 – Asimetría rendimiento-madurez: los biosensores MOF logran LOD de 135 pM para Cu^{2+} (TRL 2–3) mientras el CALF-20 con propiedades modestas alcanza TRL 7–8. El determinante no es el rendimiento extremo sino la combinación robustez-escalabilidad-costo (Kang & Kim, 2025).

Contextualización frente a revisiones recientes. Se confirma la madurez de la captura de CO_2 (Li et al., 2024; Kang & Kim, 2025). Se amplía en tres puntos: (a) los COFs compiten con MOFs solo en dominios de funcionalidad orgánica, no en catálisis ni EC-MOFs (cf. Freund et al., 2021); (b) las capacitancias $>2,000$ F/g corresponden a derivados carbonizados, no a MOFs prístinos (cf. Sandhu et al., 2024); (c) existe una brecha entre cribado computacional y verificación de sintetizabilidad (cf. Liu et al., 2025; Park et al., 2024).

Desafíos Actuales y Perspectivas Futuras Estabilidad y Análisis Tecnoeconómico

A un costo de 100–500 USD/kg, los MOFs son 10–250 veces más caros que zeolitas (2–10 USD/kg) y carbones activados (1–5 USD/kg). Sin embargo, el análisis de costo total de propiedad revela que la mayor capacidad por unidad de masa, la menor temperatura de regeneración (60–80 °C vs. >100 °C) y la mayor selectividad pueden compensar el diferencial de precio en aplicaciones donde la eficiencia energética del proceso es determinante. La producción del CALF-20 por BASF demostró reducciones de costo de 5–10× respecto a síntesis de laboratorio, y diversos informes de mercado (Grand View Research, Allied Market Research) proyectan tasas de crecimiento anual compuesto (CAGR) del orden de 30–40% para el mercado global de MOFs en el período 2024–2030 (Chakraborty et al., 2025; Kang & Kim, 2025).

Toxicología y Marco Regulatorio

No existen estudios de toxicidad crónica (>6 meses) in vivo para ningún MOF, y la ausencia de marcos regulatorios específicos en FDA y EMA constituye la barrera más significativa para la traducción clínica. El pipeline de Menon y Fairen-Jimenez (2025), que combina descriptores moleculares con modelos de ML para el cribado de 86,000 estructuras, marca un avance hacia la preselección computacional de candidatos biocompatibles. El marco de Seguridad y Sostenibilidad por Diseño (SSbD, Safe and Sustainable by Design) propuesto por Chakraborty et al. (2025) establece directrices para integrar consideraciones de toxicología, análisis de ciclo de vida (LCA) y economía circular desde las etapas tempranas del diseño de nuevos MOFs.

Tabla 5 Matriz de Vacíos de Investigación y Acciones Prioritarias

Vacío de investigación	Estado actual	Acción prioritaria	Horizonte
Estabilidad hidrolítica	Variable; UiO estable	Diseño comput. MOFs Zr/Al	2–3 años
Escalabilidad industrial	CALF-20 (TRL 7–8)	Flujo continuo, mecanoquímica	3–5 años
Toxicología crónica	Sin datos >6 meses	Estudios in vivo + cribado	ML5–7 años
Marco regulatorio	Inexistente (FDA/EMA)	Propuestas SSbD + estándares	5–10 años
Trilema conductividad	σ , porosidad o estab.	Ingeniería de bandas MOFs 2D	3–5 años
Brecha (AWH)	lab-campo Rendimiento <50% lab.	Ingeniería dispositivos	2–4 años
Costo de producción	100–500 USD/kg	Síntesis verde, reciclaje ligandos	3–5 años
IA + robótica síntesis	Demos aisladas	Laboratorio autónomo integrado	5–7 años

Nota. comput. = computacional; LCA = Análisis de Ciclo de Vida; SSbD = Safe and Sustainable by Design; ML = aprendizaje automático; σ = conductividad eléctrica; lab. = laboratorio; AWH = recolección de agua atmosférica.

Inteligencia Artificial y Diseño Computacional

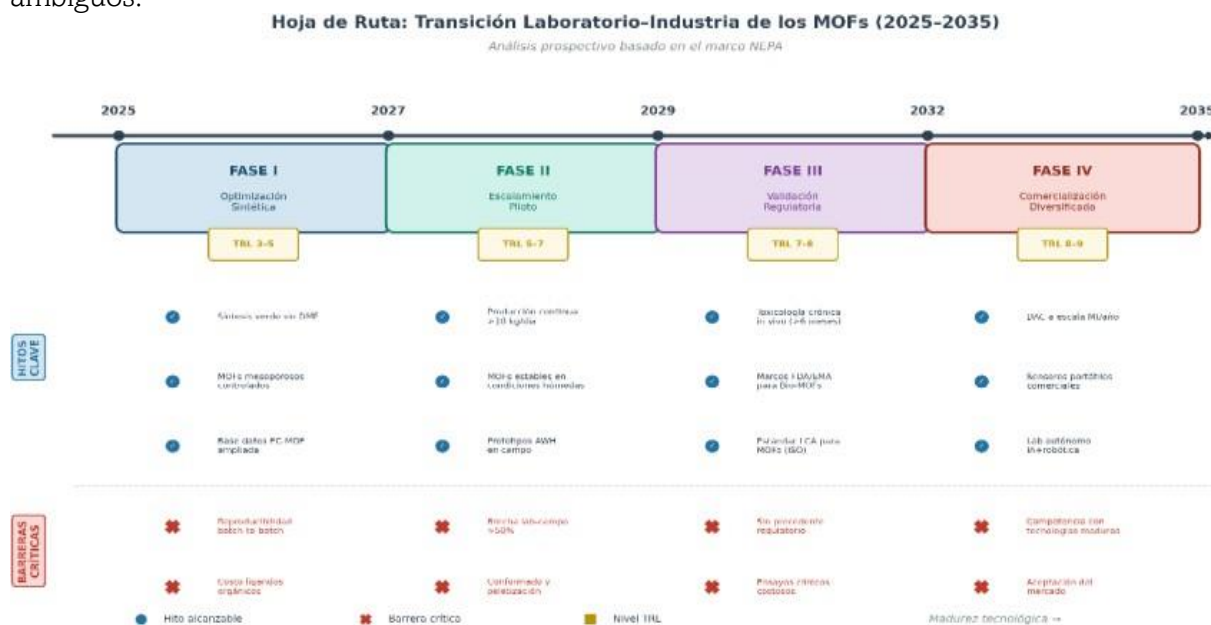
La convergencia entre inteligencia artificial, robótica de síntesis y caracterización de alto rendimiento está configurando un nuevo paradigma para el descubrimiento acelerado de MOFs. El análisis de defectos de enlazador ausente en MOFs mediante simulaciones de

dinámica molecular ha revelado efectos significativos sobre las propiedades de transporte, proporcionando guías para la optimización de materiales funcionales (Islamov et al., 2020). Liu et al. (2025) proporcionaron una visión general exhaustiva de las aplicaciones de ML en MOFs, abarcando desde predicción de propiedades hasta clasificación de diseño. El marco GHP-MOFassemble (Park et al., 2024) integra modelos de difusión generativos con redes neuronales de grafos cristalinos para diseñar MOFs con alta capacidad de CO₂ y ligandos sintetizables, demostrando que la IA puede proponer candidatos que los métodos tradicionales no habrían identificado.

Los enfoques de cribado de alto rendimiento han permitido evaluar más de 11,000 MOFs para almacenamiento de H₂, identificando candidatos con capacidades superiores a 9.0 wt% a 77 K (Kim et al., 2025). Yao et al. (2021) demostraron la capacidad predictiva de modelos generativos inversos aplicados a la base de datos de MOFs computacionales. La convergencia entre inteligencia artificial, robótica de síntesis y caracterización de alto rendimiento configura el paradigma de laboratorio autónomo que podría comprimir el ciclo de descubrimiento de años a semanas (Han et al., 2025), representando potencialmente la transformación más disruptiva en el campo desde la formalización de la química reticular.

Figura 4 Hoja de Ruta Propuesta para la Transición Laboratorio-Industria de los MOFs (2025–2035)

La restricción al idioma inglés puede haber excluido estudios relevantes del ámbito sinoparlante. Asimismo, la revisión por un único autor limita la concordancia inter-evaluadores, aspecto mitigado mediante protocolo a priori y doble verificación de casos ambiguos.



Nota. se muestran cuatro fases con hitos clave y barreras críticas: Fase I (2025–2027): optimización de síntesis; Fase II (2027–2029): escalamiento piloto; Fase III (2029–2032): validación regulatoria; Fase IV (2032–2035): comercialización diversificada.

Limitaciones de la Revisión

La presente revisión sistemática presenta varias limitaciones que deben considerarse al interpretar sus hallazgos. En primer lugar, la búsqueda sistemática se restringió a tres bases de datos (Web of Science, Scopus y PubMed), excluyendo Google Scholar y literatura gris (tesis doctorales, informes técnicos, preprints), lo cual puede introducir un sesgo de publicación hacia resultados positivos en revistas de alto impacto. En segundo lugar, si bien la búsqueda PRISMA se limitó al período 2022–2026, se complementó con 16 referencias seminales y suplementarias (1999–2025) identificadas mediante búsqueda manual y método de bola de nieve (snowball), ampliando la cobertura temporal y elevando el corpus total a 46 referencias. En tercer lugar, la revisión fue realizada por un único autor, lo que impide calcular concordancia inter-evaluadores en la fase de selección, aspecto que limita la replicabilidad del

proceso de cribado. Finalmente, la naturaleza multidisciplinaria del campo de los MOFs hace que la cobertura equilibrada de diez dominios aplicativos implique necesariamente una menor profundidad en cada uno respecto a revisiones temáticas especializadas.

CONCLUSIONES

Las estructuras metalorgánicas se han consolidado como materiales transformadores con potencial para impactar múltiples sectores industriales y científicos. El marco NEPA desarrollado en esta revisión permite sintetizar cinco conclusiones principales. Primera, la captura de CO₂ es la aplicación más cercana a la madurez comercial (TRL 7–8), con el CALF-20 como primer MOF producido a escala industrial. Segunda, el "trilema de la conductividad" la imposibilidad actual de combinar alta conductividad, alta porosidad y estabilidad en un solo material constituye el reto sintético más fundamental para los EC- MOFs. Tercera, las aplicaciones biomédicas enfrentan un cuello de botella regulatorio más que científico, dado que los avances en biocompatibilidad y eficacia terapéutica superan la capacidad de los marcos regulatorios existentes. Cuarta, la brecha de costo está cerrándose aceleradamente con la entrada de productores industriales como BASF y el desarrollo de métodos de síntesis escalables. Quinta, la convergencia entre IA, robótica y diseño computacional transformará el ciclo de descubrimiento, con el potencial de comprimir el tiempo desde el diseño conceptual hasta la validación experimental de años a semanas.

El marco NEPA demuestra su utilidad al revelar tres patrones recurrentes: (a) la tensión entre propiedades optimizadas para una aplicación y las requeridas para otra (p. ej., porosidad vs. conductividad), (b) la importancia crítica de las interfaces MOF- electrolito, MOF-polímero y MOF-tejido biológico como determinantes del rendimiento en condiciones reales, y (c) la necesidad de evaluar los MOFs en comparación cuantitativa con las tecnologías que pretenden reemplazar, no meramente contra otros MOFs. Estas conclusiones apuntan a que

el próximo salto del campo no dependerá exclusivamente de nuevos materiales, sino de la integración de MOFs en sistemas ingenieriles complejos y de la construcción de marcos regulatorios adaptados a esta nueva clase de materiales.

Declaración de Contribuciones del Autor (CRediT)

Joel Antonio Marte Peralta: Conceptualización, Metodología, Investigación, Curación de datos, Análisis formal, Redacción del borrador original.

Declaración de Financiamiento y Conflictos de Interés

Este artículo de revisión no recibió financiamiento específico de agencias del sector público, comercial o sin fines de lucro. El autor declara no tener conflictos de interés financieros ni personales que pudieran haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelkareem, M. A., Abbas, Q., Sayed, E. T., Shehata, N., Parambath, J. B. M., Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2024). Recent advances on metal–organic frameworks (MOFs) and their applications in energy conversion devices: Comprehensive review. *Energy*, 299, 131127. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131127>
- Almassad, H. A., Abaza, R. I., Siwwan, L., Al-Maythalony, B., & Cordova, K. E. (2022). Environmentally adaptive MOF-based device enables continuous self-optimizing atmospheric water harvesting. *Nature Communications*, 13, 4873. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32642-0>
- Atta, M. R., Al-Mahmodi, A. F., Al-Dhawi, B. N. S., & Khan, M. M. R. (2025). MOF-based catalysts for CO₂ reduction via photo-, electro-, and photoelectrocatalysis: A review. *Academia Green Energy*, 2(1), Article 7604. <https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7604>

- Bose, S., Sengupta, D., Rayder, T. M., Wang, X., Kirlikovali, K. O., Sekizkardes, A. K., Islamoglu, T., & Farha, O. K. (2024). Challenges and opportunities: Metal–organic frameworks for direct air capture. *Advanced Functional Materials*, 34(43), 2307478.
<https://doi.org/10.1002/adfm.202307478>
- Chakraborty, S., Menon, D., Mikulska, I., Pfrang, C., Fairen-Jimenez, D., Misra, S. K., & Lynch, I. (2025). Make metal–organic frameworks safe and sustainable by design for industrial translation. *Nature Reviews Materials*, 10, 167–169. <https://doi.org/10.1038/s41578-025-00774-6>
- Check, B., Bairley, K., Santarelli, J., Pham, H. T. B., & Park, J. (2025). Applications of electrically conductive metal–organic frameworks: From design to fabrication. *ACS Materials Letters*, 7(2), 465–488. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.4c02110>
- Chen, Z., Kirlikovali, K. O., Idrees, K. B., Wasson, M. C., & Farha, O. K. (2022). Porous materials for hydrogen storage. *Chem*, 8(3), 693–716.
<https://doi.org/10.1016/j.chempr.2022.01.012>
- Ding, M., Flaig, R. W., Jiang, H. L., & Yaghi, O. M. (2019). Carbon capture and conversion using metal–organic frameworks and MOF-based materials. *Chemical Society Reviews*, 48(10), 2783–2828. <https://doi.org/10.1039/C8CS00829A>
- Eddaoudi, M., Kim, J., Rosi, N., Vodak, D., Wachter, J., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2002). Systematic design of pore size and functionality in isorecticular MOFs and their application in methane storage. *Science*, 295(5554), 469–472.
<https://doi.org/10.1126/science.1067208>

- Farha, O. K., Yazaydin, A. Ö., Eryazici, I., Malliakas, C. D., Hauser, B. G., Kanatzidis, M. G., Nguyen, S. T., Snurr, R. Q., & Hupp, J. T. (2010). De novo synthesis of a metal–organic framework material featuring ultrahigh surface area and gas storage capacities. *Nature Chemistry*, 2(11), 944–948. <https://doi.org/10.1038/nchem.834>
- Freund, R., Zaremba, O., Arnauts, G., Ameloot, R., Skorupskii, G., Dincă, M., Bavykina, A., Gascon, J., Ejsmont, A., Goscianska, J., Kalmutzki, M., Lächelt, U., Ploetz, E., Diercks, C. S., & Wuttke, S. (2021). The current status of MOF and COF applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 60(45), 23975–24001. <https://doi.org/10.1002/anie.202106259>
- Furukawa, H., Cordova, K. E., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The chemistry and applications of metal–organic frameworks. *Science*, 341(6149), 1230444. <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
- Guan, H. Y., LeBlanc, R. J., Xie, S. Y., & Yue, Y. (2018). Recent progress in the syntheses of mesoporous metal–organic framework materials. *Coordination Chemistry Reviews*, 369, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.05.001>
- Han, Z., Yang, Y., Rushlow, J., Huo, J., Liu, Z., Hsu, Y.-C., Yin, R., Wang, M., Liang, R., Wang, K.-Y., & Zhou, H.-C. (2025). Development of the design and synthesis of metal–organic frameworks (MOFs)—from large scale attempts, functional oriented modifications, to artificial intelligence (AI) predictions. *Chemical Society Reviews*, 54, 367–395. <https://doi.org/10.1039/D4CS00432A>
- Hanikel, N., Prévot, M. S., & Yaghi, O. M. (2020). MOF water harvesters. *Nature Nanotechnology*, 15, 348–355. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0673-x>

- Horcajada, P., Gref, R., Baati, T., Allan, P. K., Maurin, G., Couvreur, P., Férey, G., Morris, R. E., & Serre, C. (2012). Metal–organic frameworks in biomedicine. *Chemical Reviews*, 112(2), 1232–1268. <https://doi.org/10.1021/cr200256v>
- Islamov, M., Babaei, H., & Wilmer, C. E. (2020). Influence of missing linker defects on the thermal conductivity of metal–organic framework HKUST-1. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(50), 56172–56177. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16127>
- Kang, Y., & Kim, J. (2025). Metal–organic frameworks for the future. *Nature Nanotechnology*, 20, 1539. <https://doi.org/10.1038/s41565-025-02095-9>
- Kang, M. S., Heo, I., Park, S. H., Bae, J., Kim, S., Kim, G., Kim, B.-H., Jeong, N. C., & Yoo, W. C. (2024). Time-efficient atmospheric water harvesting using fluorophenyl oligomer incorporated MOFs. *Nature Communications*, 15, 9793. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53853-7>
- Kim, W.-T., Lee, W.-G., An, H.-E., Furukawa, H., Jeong, W., Kim, S.-C., Long, J. R., Jeong, S., & Lee, J.-H. (2025). Machine learning-assisted design of metal–organic frameworks for hydrogen storage: A high-throughput screening and experimental approach. *Chemical Engineering Journal*, 507, 160766. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160766>
- Li, H., Eddaoudi, M., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (1999). Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal–organic framework. *Nature*, 402, 276–279. <https://doi.org/10.1038/46248>
- Li, D., Yadav, A., Zhou, H., Roy, K., Thanasekaran, P., & Lee, C. (2024). Advances and applications of metal–organic frameworks (MOFs) in emerging technologies: A comprehensive review. *Global Challenges*, 8(2), 2300244. <https://doi.org/10.1002/gch2.202300244>

Liu, Y., Dong, Y., & Wu, H. (2025). Comprehensive overview of machine learning applications in MOFs: From modeling processes to latest applications and design classifications.

Journal of Materials Chemistry A, 13(4), 2403–2440.

<https://doi.org/10.1039/D4TA06740A>

- Menon, D., & Fairen-Jimenez, D. (2025). Guiding the rational design of biocompatible metal-organic frameworks for drug delivery. *Matter*, 8, 101958.
<https://doi.org/10.1016/j.matt.2025.101958>
- Moghadam, P. Z., Li, A., Wiggin, S. B., Tao, A., Maloney, A. G. P., Wood, P. A., Ward, S. C., & Fairen-Jimenez, D. (2017). Development of a Cambridge Structural Database subset: A collection of metal-organic frameworks for past, present, and future. *Chemistry of Materials*, 29(7), 2618–2625. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b00441>
- Nguyen, N. T. T., Nguyen, T. T. T., Ge, S., Liew, R. K., Nguyen, D. T. C., & Tran, T. V. (2024). Recent progress and challenges of MOF-based nanocomposites in bioimaging, biosensing and biocarriers for drug delivery. *Nanoscale Advances*, 6(7), 1800–1821.
<https://doi.org/10.1039/D3NA01075A>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Parashar, R. K., Jash, P., Zharnikov, M., & Mondal, P. C. (2024). Metal-organic frameworks in semiconductor devices. *Angewandte Chemie International Edition*, 63(15), e202317413.
<https://doi.org/10.1002/anie.202317413>
- Park, H., Yan, X., Zhu, R., Huerta, E. A., Chaudhuri, S., Cooper, D., Foster, I., & Tajkhorshid, E. (2024). A generative artificial intelligence framework based on a molecular diffusion model for the design of metal-organic frameworks for carbon capture. *Communications Chemistry*, 7, 21. <https://doi.org/10.1038/s42004-023-01090-2>

- Rosales-Martínez, C., Javan Nikkhah, S., Zanatta, M., Martínez, J. C., Vandichel, M., & Abánades Lázaro, I. (2025). Multivariate modulation of Zr₆ UiO-66 for enhanced cooperative CO₂ adsorption through defect multi-functionalisation. *Materials Horizons*, 12, 5689–5693. <https://doi.org/10.1039/D5MH00650C>
- Rubio-Martínez, M., Avci-Camur, C., Thornton, A. W., Imaz, I., Maspocho, D., & Hill, M. R. (2017). New synthetic routes towards MOF production at scale. *Chemical Society Reviews*, 46(11), 3453–3480. <https://doi.org/10.1039/C7CS00109F>
- Sadovnik, N., Lyu, P., Nouar, F., Muschi, M., Qin, M., Maurin, G., Serre, C., & Daturi, M. (2024). Metal–organic frameworks based on pyrazolates for the selective and efficient capture of formaldehyde. *Nature Communications*, 15, 9456. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53572-z>
- Saha, R., Gómez-García, C. J., & Samanta, D. (2024). Strategies to improve electrical conductivity in metal–organic frameworks: A comparative study. *Crystal Growth & Design*, 24(5), 2235–2265. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.3c01162>
- Sandhu, Z. A., Raza, M. A., Awwad, N. S., Ibrahim, H. A., Farwa, U., Ashraf, S., Dildar, A., Fatima, E., Ashraf, S., & Ali, F. (2024). Metal–organic frameworks for next-generation energy storage devices: A systematic review. *Materials Advances*, 5(1), 30–50. <https://doi.org/10.1039/D3MA00822C>
- Shan, H., Poredoš, P., Tan, S. C., & Wang, R. (2024). Hygroscopic salt-embedded composite materials for sorption-based atmospheric water harvesting. *Nature Reviews Materials*, 9(10), 699–721. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00721-x>
- Sun, L., Campbell, M. G., & Dincă, M. (2016). Electrically conductive porous metal–organic frameworks. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(11), 3566–3579. <https://doi.org/10.1002/anie.201506219>

- Wang, Q., & Astruc, D. (2020). State of the art and prospects in metal–organic framework (MOF)-based and MOF-derived nanocatalysis. *Chemical Reviews*, 120(2), 1438–1511.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00223>
- Wei, Y. S., Zhang, M., Zou, R., & Xu, Q. (2020). Metal–organic framework-based catalysts with single metal sites. *Chemical Reviews*, 120(21), 12089–12174.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00757>
- Yaghi, O. M., O'Keeffe, M., Ockwig, N. W., Chae, H. K., Eddaoudi, M., & Kim, J. (2003). Reticular synthesis and the design of new materials. *Nature*, 423, 705–714.
<https://doi.org/10.1038/nature01650>
- Yang, J., & Yang, Y. W. (2020). Metal–organic framework-based cancer theranostic nanoplateforms. *VIEW*, 1(2), e20. <https://doi.org/10.1002/viw2.20>
- Yao, Z., Sánchez-Lengeling, B., Bober, N. S., Narayanan, B., Aspuru-Guzik, A., & Smit, B. (2021). Inverse design of nanoporous crystalline reticular materials with deep generative models. *Nature Machine Intelligence*, 3, 76–86.
<https://doi.org/10.1038/s42256-020-00271-1>
- Yusuf, V. F., Malek, N. I., & Kailasa, S. K. (2022). Review on metal–organic framework classification, synthetic approaches, and influencing factors: Applications in energy, drug delivery, and wastewater treatment. *ACS Omega*, 7(49), 44507–44531.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05310>
- Zhang, G., Li, H., Wang, Q., & Zhang, Z. (2025). Metal-organic framework derivatives with complex architectures: Controllable synthesis and applications. *Nano Research*, 18(3), 94907229. <https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907229>

Zhao, Y., Song, Z., Li, X., Sun, Q., Cheng, N., Lawes, S., & Sun, X. (2016). Metal organic frameworks for energy storage and conversion. *Energy Storage Materials*, 2, 35–62.

<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2015.11.005>

Zhong, Y., Zhang, L., Li, X., El Fil, B., Díaz-Marín, C. D., Li, A. C., Liu, X., LaPotin, A., & Wang, E. N. (2024). Bridging materials innovations to sorption-based atmospheric water harvesting devices. *Nature Reviews Materials*, 9(10), 681–698.

<https://doi.org/10.1038/s41578-024-00665-2>

Zorainy, M. Y., Gar Alalm, M., Kaliaguine, S., & Boffito, D. C. (2024). Metal organic frameworks for wastewater treatment, renewable energy and circular economy contributions. *Clean Water*, 7, 124. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00408-4>

La Revista utiliza códigos para identificar al Revisor y al equipo de
PARES REVISORES. Si tiene dudas o consultas, contacte a:
contacto@cienciayreflexion.org
Código de Editor: 108
Código de Revisores: 1027

