

REDES METALORGÁNICAS LUMINISCENTES DE Zn(II) COMO AGENTES QUIMIOSENSORES EN LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS EN RECURSOS HÍDRICOS

*LUMINESCENT Zn(II) METALORGANIC FRAMEWORKS AS
CHEMOSENSING AGENTS FOR PESTICIDE DETECTION IN
WATER RESOURCES*

ROSALES VÁZQUEZ, Luis David ¹

MORALES LUCKIE, Raúl Alberto ²

SÁNCHEZ MENDIETA, Víctor ²

TÉLLEZ LÓPEZ, Antonio ¹

RESUMEN

La aplicación extensa de pesticidas y herbicidas en los sectores agrícola y doméstico exige un avance continuo en las tecnologías de su detección y monitoreo. Dada la amenaza ambiental y sanitaria que representa la bioacumulación de estas especies tóxicas en fuentes hídricas, alimentos y suelos, existe una necesidad imperativa y creciente de desarrollar métodos de detección en tiempo real, que sean económicos, precisos y que operen eficientemente en muestras ambientales complejas. En los últimos años, el uso de redes metalorgánicas (MOF) luminiscentes en su aplicación como sensores de contaminantes del agua ha brindado resultados prometedores, como una alternativa eficiente, selectiva, económica y reproducible para el monitoreo de sustancias tóxicas en cuerpos acuáticos. Particularmente, los MOF basados en Zn(II) destacan debido a su estructura robusta, propiedades luminiscentes y prometedora biocompatibilidad en la detección óptica de agroquímicos nocivos. Estos materiales quimiosensores fundamentan su mecanismo de respuesta en procesos primarios de transferencia de carga y emisión intraligante. Esta capacidad permite el análisis cuantitativo de contaminantes peligrosos mediante la medición de sus propiedades de luminiscencia en tiempo real. Por consiguiente, en el presente artículo se destacan ejemplos recientes que ilustran el diseño estructural y las capacidades de reconocimiento selectivo y respuesta fluorescente de estos arreglos de coordinación cristalinos basados en Zn(II), para la cuantificación directa y precisa de pesticidas y herbicidas de uso común en muestras reales de sistemas acuáticos.

Palabras clave: detección de pesticidas; fluorescencia; MOF; Zn(II).

1. División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica del Valle de Toluca. Almoloya de Juárez, Estado de México, México.
2. Facultad de Química, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS), Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

Correspondencia
ld_222@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9704-5146>
Fecha de recepción
5 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación
14 de mayo de 2026.

ABSTRACT

The widespread application of pesticides and herbicides in agricultural and domestic settings underscores the necessity for continuous advancements in monitoring technology. Given the critical environmental and health risks associated with the bioaccumulation of these noxious species in water sources, food products, and soil, an imperative and evolving need exists for new, real-time, economical, and precise sensing techniques effective within complex environmental samples. This paper addresses this technological deficiency by providing a critical overview of the state-of-the-art in utilizing Luminescent Metal-Organic Frameworks (LMOF). Specifically, the review highlights Zn-based LMOF chosen for their robust structure, high porosity, and promising biocompatibility for the optical detection of these harmful agrochemicals. Emphasis is placed on their proven efficacy in aqueous media and real-sample analysis. These chemosensory materials derive their emission primarily from charge transfer and intraligand emission processes. Such mechanisms enable the quantitative analysis of hazardous pollutants by tracking dynamic alterations in their luminescence properties in real-time. Accordingly, the article reviews recent examples illustrating the structural design, luminescence performance, and selective recognition capabilities of these Zn(II)-based crystalline coordination arrays for the direct and accurate quantification of common pesticides and herbicides in aqueous systems.

Keywords: MOF; Zn, luminescent properties; sensing of pesticides and herbicides.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la producción y el suministro de alimentos enfrentan desafíos importantes, impulsados por la necesidad de sostener las tasas de consumo ante el crecimiento demográfico mundial (Tilman et al., 2011). Desde hace décadas, el cultivo eficiente de las cosechas se ha basado en la aplicación de agroquímicos, como pesticidas y herbicidas.

Los plaguicidas empleados en la agricultura moderna comprenden una amplia variedad de compuestos químicos clasificados según su función: insecticidas (que controlan plagas de insectos), herbicidas (que eliminan

malezas) y fungicidas (que combaten hongos patógenos), entre otros. Desde el punto de vista estructural, los grupos más relevantes incluyen los organofosforados (paratión, clorpirifos, acefato), los neonicotinoides (imidacloprid, dinotefuran, nitenpiram), los bipiridilos (paraquat, diquat), los organoclorados (2,6-dicloro-4-nitroanilina) y los benzimidazoles (carbendazim, metil-tiofanato), los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en cultivos de uso global. La figura 1 ilustra las estructuras químicas representativas de los pesticidas y herbicidas de mayor interés en este estudio.

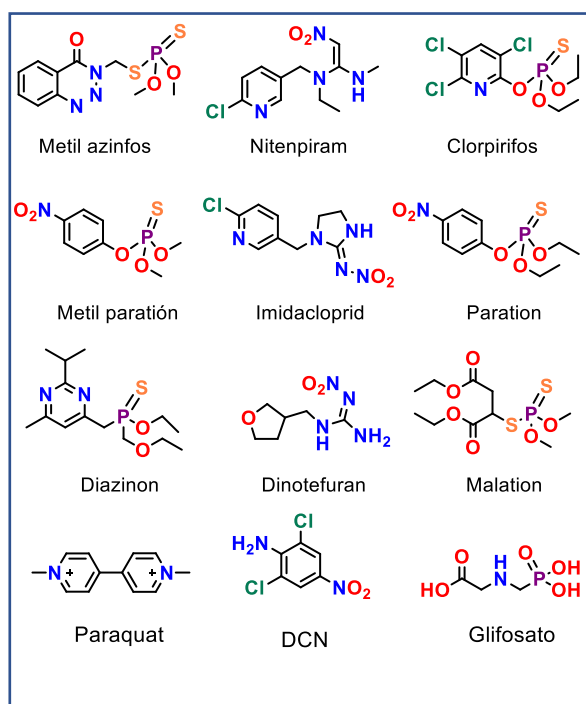


Figura 1. Pesticidas y herbicidas de uso común

A pesar de los esfuerzos por implementar técnicas de producción más limpias, la mayor parte de la producción alimentaria vegetal global sigue dependiendo de estas sustancias (Popp et al., 2013). En este contexto, es importante resaltar que solamente el 1 % de los pesticidas aplicados alcanza su especie objetivo (Pimentel, 1995), mientras que el 99 % restante tiende a bioacumularse en la cadena trófica, así como en los cuerpos de agua, generando daños ambientales irreversibles y problemas de salud graves en humanos (Aktar et al., 2009; Damalas & Eleftherohorinos, 2011). Entre ellos destacan los trastornos neurológicos, vinculados al aumento del riesgo de las



enfermedades de Parkinson y de Alzheimer, disrupciones endocrinas que afectan la función reproductiva y el desarrollo, y un mayor riesgo de desarrollar diversos tipos de cáncer (Mnif et al., 2011; Mostafalou & Abdollahi, 2013). Estos compuestos pueden actuar como genotóxicos y mutagénicos, además de interferir con la señalización celular y la función inmunológica normal, lo que resalta la necesidad de un monitoreo y una regulación estrictos (Carvalho, 2017).

Aunque existen técnicas analíticas con buena sensibilidad para detectar estos compuestos, como la cromatografía de gases o la espectrometría de masas, su implementación in situ se ve limitada por la necesidad de preparar muestras especializadas y el alto costo del equipamiento (Chauhan et al., 2017; Hernández et al., 2013; Lozowicka, 2015). Es aquí donde técnicas como la fluorescencia emergen como métodos de detección eficientes, rápidos y simples para compuestos orgánicos nocivos, mediante la aplicación de sondas fluorescentes capaces de detectar dichos agentes contaminantes (Wang et al., 2019).

Las redes metalorgánicas (MOF, por sus siglas en inglés), particularmente las luminiscentes, han demostrado ser sondas muy eficaces, selectivas y, a menudo, reciclables en su aplicación en la quimiodetección luminiscente de especies nocivas (Hu et al., 2013). La ventaja de estas redes de coordinación radica en la facilidad para modular su estructura y propiedades de fluorescencia, junto con la creciente estabilidad en medios acuosos, una característica indispensable para el análisis práctico de muestras reales.

El diseño de MOF luminiscentes suele estar enfocado en su ensamblaje con ligantes π - π conjugados cuya función, además de servir como puentes entre los nodos metálicos, es promover los mecanismos de emisión conocidos, tales como la emisión centrada en el ligante (CL), las transferencias de carga (TC); Ligante-Metal (TCLM), Metal-Ligante (TCML) y Ligante-Ligante (TCLL). En el caso de los centros metálicos, que fungen como nodos estructurales de las redes, destaca el uso de lantánidos, iones que por sí mismos poseen propiedades luminiscentes y que se ven amplificadas por los ligantes mediante el conocido "efecto antena" (Hasegawa & Kitagawa, 2022). Notablemente, sobre todo desde el punto de vista económico, son de interés los metales diamagnéticos de capa cerrada, cuyos procesos de relajación tras una incidencia de energía resulten en mecanismos radiativos. Entre ellos destacan los MOF basados en Zn(II), cuya disponibilidad, accesibilidad, bajo costo y potencial biocompatibilidad los han colocado como candidatos idóneos y de auge



creciente en la detección de pesticidas y herbicidas en agua en los últimos años (Wang et al., 2019).

La elección de los MOF de Zn(II) como eje central de esta revisión responde además a otros atributos inherentes del metal: en primer lugar, su configuración electrónica d^{10} favorece transiciones intraligante con rendimientos cuánticos comparativamente elevados; en segundo lugar, la literatura reciente evidencia un crecimiento notable en el número de reportes de detección de pesticidas y herbicidas basados específicamente en Zn(II)-MOF, con límites de detección inferiores a los máximos permitidos por regulaciones internacionales (Rosales-Vázquez et al., 2021); y en tercer lugar, la versatilidad sintética del Zn(II) para adoptar distintas geometrías de coordinación permite diseñar arquitecturas porosas con cavidades adaptadas a analitos de interés agronómico, características que en conjunto los posicionan como una de las plataformas más prometedoras y activas en el campo de la quimiodetección óptica de agroquímicos (Wang et al., 2019). Ante dicha tendencia, resulta conveniente y de particular interés destacar el estado del arte de estos materiales híbridos funcionales en su contribución al control de contaminantes y a la mitigación de sus efectos adversos en sistemas hídricos. En el presente artículo se profundiza en la revisión bibliográfica de dichos materiales en su aplicación específica en medios acuosos, primero mencionando las principales características de diseño de MOF luminiscentes de Zn(II) para la detección de pesticidas y herbicidas, y posteriormente abordando ejemplos recientes en la literatura.

METODOLOGÍA

1. ALCANCE Y DISEÑO DE LA REVISIÓN

La presente contribución se desarrolló bajo el diseño de una revisión bibliográfica sistemática de alcance descriptivo-analítico. El trabajo se orientó a consolidar el conocimiento generado en torno al diseño, las propiedades fotofísicas y el desempeño como quimiosensor de las redes metalorgánicas luminiscentes basadas en Zn(II) para la detección de pesticidas y herbicidas en agua. Se dio mayor importancia al análisis comparativo entre sistemas para identificar tendencias en el diseño de ligantes, mecanismos de sensado

predominantes y parámetros analíticos relevantes (límite de detección, selectividad y aplicabilidad en muestras reales).

2. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda de literatura se restringió a revistas científicas especializadas indexadas en las bases de datos *ScienceDirect*, *Scopus* y *Web of Science*. Como criterio de calidad editorial, se estableció un factor de impacto mínimo de 2.0 (Journal Impact Factor, JCR), garantizando la inclusión de publicaciones con un riguroso proceso de revisión por pares y alta visibilidad en la comunidad científica internacional. Todas las fuentes consultadas corresponden a artículos escritos en inglés publicados entre 2009 y 2024, con especial atención a trabajos de los últimos seis años, dado el crecimiento acelerado en el desarrollo de Zn(II)- mof con aplicaciones de quimiodetección. La búsqueda se estructuró a partir de un conjunto de términos y frases clave, específicamente seleccionados para cubrir los tres ejes temáticos del artículo: (i) la química de coordinación del Zn(II) en mof; (ii) la fotofísica y luminiscencia de los materiales; y (iii) la aplicación analítica para la detección de agroquímicos en agua. Los términos empleados (tanto de forma independiente como combinados mediante los operadores booleanos AND, OR y NOT) incluyeron, entre otros:

- *Zn(II) metal-organic framework AND luminescent AND pesticide*
- *Zn-mof AND fluorescence sensing AND aqueous detection*
- *metal-organic framework AND turn-off fluorescence AND herbicide*
- *Zn-based mof AND ratiometric sensor AND herbicide OR pesticide*
- *metal-organic framework AND water stability AND pesticide limit of detection*
- *Zn(II) coordination network AND real water sample*
- *luminescent Zn- mof AND pesticide OR herbicide*
- *metal-organic framework NOT lanthanide AND pesticide sensing*

3. SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD

La incorporación de cada referencia al análisis requirió el cumplimiento simultáneo de los siguientes criterios: publicación en revista indexada con factor de impacto ≥ 2.0 ; reporte explícito de al menos un parámetro analítico cuantitativo (límite de detección, constante de Stern-Volmer o porcentaje de



recuperación en muestra real) y uso de Zn(II) como nodo metálico principal del mof. Se excluyeron revisiones que no incluyeran datos experimentales originales, reportes de sensores no luminiscentes y trabajos en los que la detección se llevara a cabo exclusivamente en disolventes orgánicos, sin aplicación en medio acuoso o muestra ambiental.

4. ORGANIZACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO

La información extraída de los estudios seleccionados se sistematizó en la sección de «Desarrollo y discusión», en la que se abordaron las características generales para el diseño de mof luminiscentes en la detección de pesticidas, en torno a tres ejes analíticos: (1) el diseño estructural y la estabilidad hidrolítica del Zn(II)- mof; (2) la naturaleza de las unidades fotoactivas y los mecanismos de modulación de la fluorescencia en presencia del analito; y (3) el desempeño quimiosensor cuantificado por los parámetros analíticos reportados. Posteriormente, esta información se plasmó en ejemplos con las vertientes principales que cumplen con los parámetros de diseño y funcionalidad. Esta estructura de análisis orientó tanto la organización de la tabla 1 como la secuencia de las secciones de desarrollo y discusión del presente artículo.

La síntesis final de los hallazgos se realizó de forma comparativa y crítica, confrontando los sistemas revisados en función de sus estrategias de diseño, de la selectividad lograda y de su aplicabilidad práctica en matrices acuosas complejas.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

1. CARACTERÍSTICAS GENERALES PARA EL DISEÑO DE MOF LUMINISCENTES DE ZN(II) EN LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS Y HERBICIDAS

La construcción de MOF luminiscentes para la detección óptica de pesticidas y herbicidas debe considerar tres elementos esenciales: (1) estabilidad química en medios acuosos, (2) emisión estable, que requiere de unidades fotoactivas que permitan mediciones reproducibles, es decir, sistemas que puedan ser monitoreados bajo parámetros de medición accesibles, robustos y repetibles

en su uso cotidiano, y (3) sitios de interacción complementarios cuya presencia les brinda la oportunidad de inducir procesos de unión selectiva y generar una respuesta analítica confiable. Estos principios se ilustran en la figura 2, donde se esquematizan los factores críticos en dicho diseño.

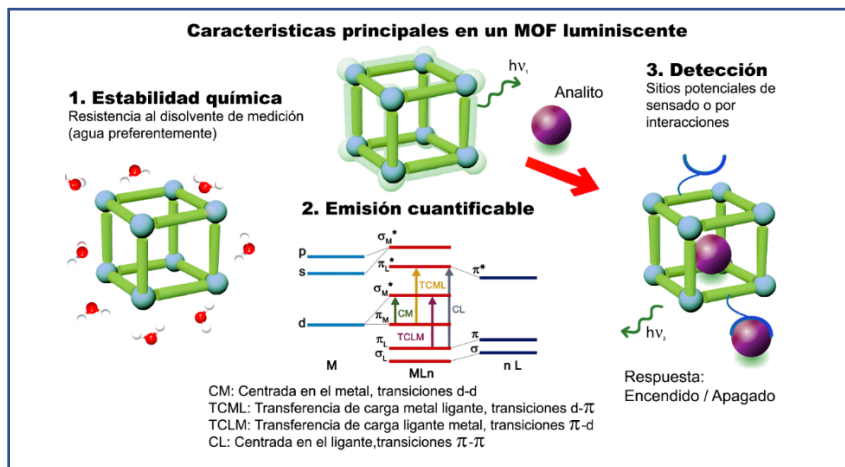


Figura 7. Claves en el diseño de MOF con aplicación en la detección luminiscente de pesticidas y herbicidas, considerando: (1) la estabilidad química en agua, (2) los procesos de emisión y (3) los sitios de unión para el analito.

1.1 Estabilidad en agua

La estabilidad frente al agua es un requisito indispensable para la aplicación práctica de estos materiales en ambientes reales. Los MOF de Zn(II) han sido ampliamente utilizados como quimiosensores para la cuantificación selectiva de aniones inorgánicos (haluros, oxoaniones) (Li et al., 2015; Zhang et al., 2014), cationes metálicos (Chen et al., 2019; Hu et al., 2014; Sun et al., 2016; Wang et al., 2017; Zhao et al., 2018), explosivos derivados de nitroaromáticos (Guo et al., 2013; He et al., 2012; Lan et al., 2009), compuestos orgánicos volátiles (Li et al., 2017; Zhang et al., 2016), aminoácidos (Chen et al., 2017; Hu et al., 2016; Zhang et al., 2015), gases contaminantes (Li et al., 2014) y antibióticos (Hu et al., 2015; Sun et al., 2018; Zhao et al., 2019). Sin embargo, los ejemplos de sensores basados en Zn(II)-MOF para la detección de pesticidas comunes siguen siendo relativamente escasos en comparación con los analitos mencionados previamente. Destacan casos como la detección de paratión (Singha et al., 2017), azinphos-metilo (Singha et al., 2018; Singha et al., 2017), 2,6-dicloro-4-nitroanilina (DCN) (Wang et al., 2019), paratión-metilo (Li et al., 2021; Weng



et al., 2021), acefato (Li et al., 2021) y clorpirifos (Li et al., 2021) en muestras reales.

A pesar de los avances, parámetros analíticos como la intensidad de la respuesta luminiscente y la sensibilidad en matrices complejas siguen siendo un desafío central. En este sentido, la estabilidad acuosa de los Zn(II)-MOF es crucial, ya que un material estable en agua mantiene su estructura cristalina y sus propiedades espectroscópicas tras la exposición prolongada a medios acuosos. Esta estabilidad se evalúa experimentalmente mediante técnicas como la espectroscopía de fluorescencia, la espectroscopía Raman, la espectroscopía infrarroja, la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X y la difracción de rayos X en polvo (Hu et al., 2013; Zhao et al., 2018).

Desde el punto de vista termodinámico, la resistencia a la hidrólisis depende de la energía libre de Gibbs asociada a los enlaces metal-ligante. La fortaleza del enlace de coordinación entre el ion Zn(II) y los ligantes orgánicos es un indicador clave de la estabilidad del complejo. Aunque estos enlaces suelen ser menos robustos que los presentes en materiales naturales como las zeolitas aluminosilicáticas (Zhao et al., 2018), el diseño de ligantes aromáticos multicarboxilatos y donadores de nitrógeno ha permitido superar parcialmente las altas energías de hidratación del Zn(II) ($-\Delta G^\circ \approx 2040 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) (Rosales-Vázquez et al., 2021), sobre todo cuando se incorporan moléculas de agua en su estructura o se emplean ligantes de carácter hidrofóbico.

Desde el punto de vista del diseño de ligantes, la estrategia más efectiva para conferir estabilidad hidrolítica a los Zn(II)-MOF ha sido la incorporación de ligantes aromáticos multicarboxilato en combinación con grupos donadores de nitrógeno (particularmente piridinas, imidazoles, triazoles). Esta combinación favorece enlaces de coordinación más robustos mediante el efecto quelato y reduce la labilidad del centro metálico frente al ataque nucleófilo del agua. Otro aspecto común demostrado en sistemas recientes es que durante el proceso de síntesis el medio de reacción involucra agua, que puede estar presente en el producto final de la estructura, como moléculas de coordinación o de cristalización, confiriendo la estabilidad hidrolítica buscada y que se detalla en los ejemplos a mencionar en la sección 2.

1.2 Procesos de emisión

En la mayoría de los MOF basados en Zn(II), la emisión dominante proviene de procesos intraligante y de transferencias de carga, generando señales

intensas en la región visible (390–520 nm), típicamente de azul a verde (Hasegawa & Kitagawa, 2022; Wang et al., 2019; Zhao et al., 2018). Estos fenómenos permiten respuestas rápidas, con tiempos de vida del orden de nanosegundos (Hu et al., 2013), y, además, son reproducibles, lo que resulta ideal para aplicaciones de sensado en tiempo real.

En consonancia con su estabilidad estructural, las unidades fotoactivas suelen ser los mismos ácidos carboxílicos polidentados aromáticos con transiciones de tipo π - π , acompañados de ligantes con grupos donadores de nitrógeno. Los ligantes por sí mismos suelen presentar un amplio grado de emisión: comúnmente baja para los anillos aromáticos de seis miembros (benceno y piridinas sustituidas) y mediana-alta para los anillos de cinco miembros y los anillos fusionados (imidazol, naftaleno, quinolinas sustituidas) (Chen et al., 2025). Independientemente del grado de emisión particular de cada ligante, es común que exhiban un incremento de sus propiedades fluorescentes en el momento en el que son coordinados y fijados al ion metálico de Zn(II) (Rosales-Vázquez et al., 2021).

La respuesta de la fluorescencia en los Zn(II)- MOF suele estar regulada por mecanismos que constituyen la base de la señal analítica ante la presencia de los pesticidas (Singha et al., 2018; Singha et al., 2017). El apagado de fluorescencia (turn-off) es la respuesta más frecuente en los Zn(II)- MOF frente a los agroquímicos y se origina principalmente por tres mecanismos: (a) la transferencia electrónica fotoinducida (PET), (b) el efecto de filtro interno (IFE) y (c) interacciones π - π o enlaces de hidrógeno que alteran la conformación del ligante. Ejemplos de la disminución de la fluorescencia atribuida a estos mecanismos se describen en los sistemas de la sección 2.

1.3 Selectividad

En el caso de los MOF luminiscentes basados en Zn(II), la interacción específica entre el pesticida y los sitios activos del marco puede inducir variaciones detectables en la intensidad o la longitud de onda de la emisión, lo que permite realizar análisis cuantitativos directos y sensibles (Singha et al., 2018; Singha et al., 2017). Estos materiales, además, ofrecen una notable versatilidad sintética, que permite una amplia gama de modificaciones en los ligantes y variaciones derivadas del tipo de ruta sintética elegida, las cuales repercuten en la geometría de coordinación, los modos de conectividad, el volumen de poro y los disolventes de cristalización, entre otros aspectos (Zhao et al., 2018).



La selectividad de los Zn(II)-MOF para pesticidas específicos depende principalmente de dos factores: los grupos funcionales presentes en los ligantes y las cavidades que el MOF podría exhibir. En cuanto a los grupos funcionales, es común que aquellos ligantes que incorporan grupos amino ($-\text{NH}_2$), hidroxilo ($-\text{OH}$) o piridilo libre hayan demostrado mayor afinidad por pesticidas con grupos nitro o catiónicos debido a sus interacciones directas con dichos grupos funcionales mediante enlaces de hidrógeno (Liu et al., 2024; Su et al., 2021). Por su parte, los sistemas con ligantes multicarboxilato y anillos de cinco miembros con nitrógeno, como los imidazoles y triazoles, aportan sitios básicos de Lewis capaces de interactuar con pesticidas catiónicos como el diquat (Liu et al., 2024). En lo concerniente al tamaño y la forma de las cavidades porosas, las que presentan dimensiones complementarias al volumen molecular del pesticida objetivo favorecen el reconocimiento por exclusión de tamaño y maximizan las interacciones de contacto útil, reduciendo así la respuesta frente a interferentes de mayor o menor volumen molecular. Esta complementariedad geométrica, combinada con la funcionalidad química de los ligantes, constituye la base del diseño racional de Zn(II)-MOF altamente selectivos para agentes contaminantes específicos en matrices ambientales complejas (Rosales-Vázquez et al., 2021; Zhao et al., 2018). Gracias a esta capacidad de personalización, estos materiales se perfilan como plataformas altamente prometedoras para el desarrollo de sensores ópticos selectivos, reproducibles y eficaces para la detección de pesticidas en matrices acuosas reales (Hasegawa & Kitagawa, 2022; Wang et al., 2019). En la siguiente sección se exhiben ejemplos selectos que ilustran cómo estos sistemas se han aplicado con éxito como herramientas analíticas, destacando la relación entre el diseño estructural y la respuesta luminiscente frente a pesticidas de uso común.

2. MOF DE ZN(II) COMO AGENTES FLUORESCENTES EN LA DETECCIÓN DE PESTICIDAS EN MEDIOS ACUOSOS

Fan et al. desarrollaron el $\text{NUC-6} = [\text{Zn}(\text{tptc})_0.5(\text{bimb})] \cdot \text{H}_2\text{O}_n$, sistema diseñado para mejorar la estabilidad química en medios acuosos mediante la combinación del ligante aromático H_4tptc (p-terfeniltetracarboxílico) y el puente flexible bimb (1,3-bis(imidazol-1-ilmetil)benceno). El uso propuesto de los ligantes responde a los postulados de la elección de ácidos



multicarboxílicos aromáticos, y la incorporación de unidades luminiscentes como el imidazol, además de que su síntesis se realiza en medio acuoso y, como resultado, el agua permanece en la estructura como molécula de cristalización, favoreciendo su hidroestabilidad (Fan et al., 2020). La estructura cristalina adopta una red tridimensional interpenetrada (4,4)-c que brinda alta resistencia frente a variaciones de pH y a diferentes disolventes orgánicos. El compuesto exhibe una emisión azul intensa a 392 nm, atribuida a procesos de emisión centrados en el ligante derivado de imidazol.

En pruebas de detección de varios pesticidas, el MOF demostró una selectividad específica para el pesticida organoclorado 2,6-dicloro-4-nitroanilina (DCN), atribuida al contacto de la red con interacciones débiles de tipo van der Waals, lo que provocó un marcado apagado de la fluorescencia (figura 3). El límite de detección alcanzado fue de 117 ppb, con una constante de Stern-Volmer de $4.51 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$. También se realizaron investigaciones acerca del mecanismo de sensado, en el que se propone la combinación de efecto de filtro interno (IFE) y la transferencia electrónica fotoinducida (PET), respaldadas por cálculos de orbitales HOMO-LUMO. En general, el material demostró buena selectividad frente a interferentes y capacidad de reutilización tras varios ciclos, consolidándose como un sensor luminiscente robusto para pesticidas y antibióticos en agua (Fan et al., 2020).

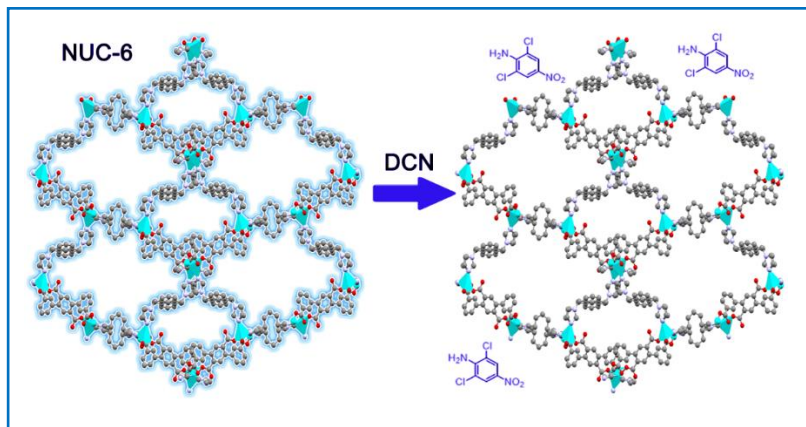


Figura 3. Representación simplificada de la red luminiscente del NUC-6 y el apagamiento tras su contacto con el pesticida DCN.

El NUC-6 es un ejemplo de sensado que parte únicamente de la emisión inherente del MOF y cuya estructura reticular es la responsable de interactuar con el huésped. En cambio, existen otros tipos de interacciones como las que Zhang et al. desarrollaron en el sistema $\text{Zn-CPTA} = [\text{Zn}_4(\text{CPTA})_2(\mu_3\text{-OH})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{DMF})_{0.5}] \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$, construido con el ligante H_3CPTA (ácido 5-(4-



carboxifenil)-1H-1,2,4-triazol) (Zhang et al., 2022). Para esta red tridimensional, la estructura cristalina se compone de unidades secundarias Zn-O-Zn con conectividad μ_3 -OH, formando canales unidimensionales decorados con oxígenos carboxilato que actúan como sitios activos de interacción. Nuevamente, el uso del agua como disolvente de reacción brindó estabilidad adicional al sistema. El material exhibió una emisión centrada en 375 nm, atribuida a procesos de emisión del ligante derivado de triazol.

En pruebas de detección, se observó un marcado apagado de la fluorescencia frente a los pesticidas nitenpyram (NTP) y nitrofurazona (NFZ), con límites de detección de 0.625 μM y 0.126 μM , respectivamente. El mecanismo de reconocimiento se explicó mediante interacciones π - π y enlaces de hidrógeno entre los ligantes aromáticos y los pesticidas. El sensor fue validado en agua de riego, lago y río, mostrando recuperaciones superiores al 90 % y una buena estabilidad tras varios ciclos de uso, consolidándose como un sensor robusto para el monitoreo de pesticidas en aguas naturales (Zhang et al., 2022).

En otro interesante enfoque, Su et al. (2021) utilizaron el MOF $[\text{Zn}(\text{TPYBDC})\cdot\text{H}_2\text{O}]_n$, cuya estructura mostró que el ligando también presentaba piridinas no coordinadas, que brindaron la característica de actuar como sitios activos de reconocimiento molecular (figura 4), mediante una estructura supramolecular 2D en capas (Su et al., 2021). Como se ha demostrado en los ejemplos previos, la síntesis en agua que repercute en las moléculas de cristalización confiere estabilidad adicional en medios acuosos. El material, además, mostró una emisión intensa al ser excitado a 290 nm y, gracias a la presencia de los grupos donadores de electrones, respondió con un marcado apagado de la fluorescencia frente a pesticidas neonicotinoides con grupo nitro, como imidacloprid, dinotefuran y nitenpiram, alcanzando eficiencias de apagado superiores al 50 % (Su et al., 2021; Wang et al., 2019).

A pesar de que no se observó buena selectividad, los límites de detección fueron satisfactorios, con valores de 0.562 μM , 0.247 μM y 0.441 μM para imidacloprid, dinotefuran y nitenpiram, respectivamente, valores inferiores a los máximos residuos permitidos en alimentos por la Unión Europea y mejores que los de otros métodos electroquímicos o basados en nanomateriales reportados previamente (Zhao et al., 2018). Además, el sensor se utilizó en varios ciclos, demostrando recuperaciones entre 94 y 115 % en muestras simuladas de agua agrícola, lo que confirma su aplicabilidad práctica. La



combinación de estructura laminar, estabilidad en medios acuosos y su sensibilidad analítica convierte a este MOF en una plataforma prometedora para la detección de pesticidas en medios acuosos reales (Su et al., 2021).

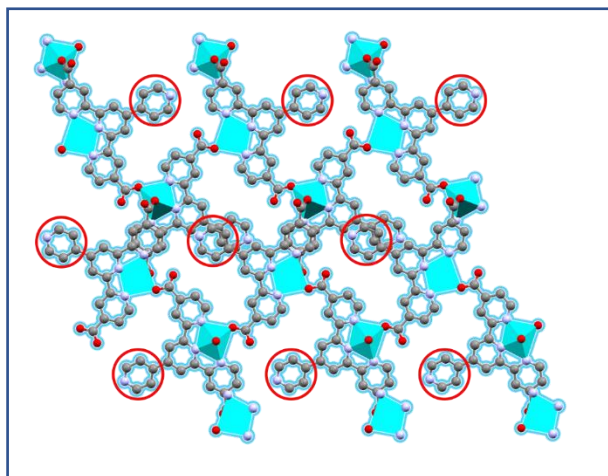


Figura 4. Identificación de los sitios de reconocimiento molecular en la red de MOF $[Zn(TPYBDC) \cdot H_2O]_n$ para el sensado de imidacloprid, dinotefuran y nitenpiram. El círculo rojo señala las piridinas no coordinadas del ligante TPYBDC, que actúan como sitios activos de unión de los pesticidas neonicotinoides.

Estructuras más complejas también han sido propuestas; por ejemplo, el diseño secuencial planeado por Liu et al. (2024) en un sistema híbrido denominado $RhB@ZnMOF = \{[Zn(TATB)(bimb)] \cdot H_2O\}_n + RhB$ buscó combinar la robustez estructural de un MOF con la capacidad de señal ratiométrica de un fluoróforo huésped (Liu et al., 2024). La red cristalina se construyó a partir del ligante H_3TATB (ácido 4,4',4''-(1,3,5-triazina-2,4,6-triil)tribenzoico), que aporta cavidades rígidas y altamente conjugadas, y del puente flexible bimb (1,3-bis(imidazol-1-ilmetil)benceno), que confiere conectividad tridimensional. Por sí misma, la elección de los ligandos brinda emisión al MOF, y su síntesis en agua, le confiere estabilidad en dicho medio. Sin embargo, la innovación consistió en incorporar rodamina B (RhB) en las cavidades del MOF, lo que generó un sistema huésped-anfitrión capaz de responder de manera dual a estímulos externos.

El material exhibió dos emisiones características (figura 5): una azul intensa, atribuida a las propiedades innatas del MOF (~ 356 nm), y otra roja, correspondiente al huésped RhB (~ 580 nm). Frente al herbicida diquat (DQ), se observó un marcado apagado de la emisión roja (IFE) acompañado de una intensificación de la emisión azul (FRET), lo que permitió establecer un mecanismo ratiométrico de detección altamente sensible (Liu et al., 2024; Zhao et al., 2018). El límite de detección calculado fue de 10.5 nM, valor significativamente inferior a los máximos residuos permitidos en agua potable.



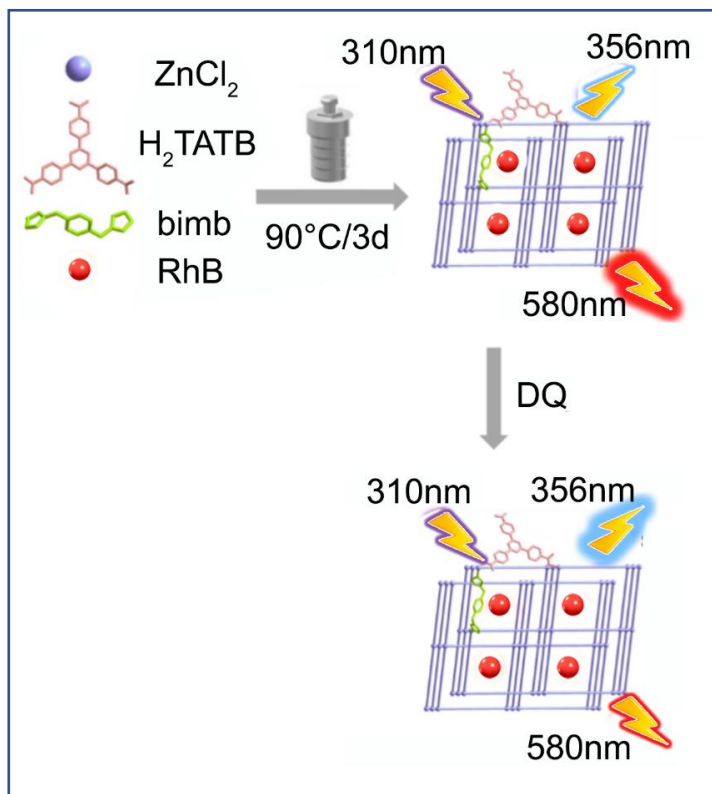


Figura 5. Representación del diseño secuencial del sistema $\{[\text{Zn}(\text{TATB})(\text{bimb})]\cdot\text{H}_2\text{O}\}_n$ (Liu et al., 2024).

El sensor fue validado en agua de grifo y en extractos de manzana, mostrando recuperaciones superiores al 95 % y una excelente selectividad frente a interferentes comunes, como otros herbicidas y compuestos orgánicos presentes en matrices vegetales. El estudio del mecanismo de respuesta indicó que la combinación del efecto de filtro interno (IFE) y la transferencia de energía por resonancia de Förster (FRET) era responsable de la señal dual, respaldada por cálculos de orbitales HOMO-LUMO y por espectros de absorción comparativos (Hasegawa & Kitagawa, 2022). La combinación de cavidades rígidas, huésped fluorescente y respuesta dual convierte este sistema en un sensor luminiscente de nueva generación, capaz de detectar herbicidas catiónicos con gran sensibilidad y aplicabilidad práctica en muestras reales de agua y de alimentos.

Continuando bajo esta vertiente para integrar arquitecturas jerárquicas, Chen et al. diseñaron el hidrogel compuesto ZIF-8 en $\text{Zn}_2\text{@SA}$, donde se combinaron dos MOF: $\text{Zn1} = \{[\text{Zn}(\text{tpt})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}]\}_n$ y $\text{Zn2} = \{[\text{Zn}_2(\text{tpt})_2(\text{bdc})]\}_n$, recubiertos con ZIF-8 y soportados en alginato de sodio (SA) (Chen et al.,



2022). La estructura resultante es tridimensional, con porosidad y buena estabilidad frente a disolventes. El material mostró fluorescencia azul-violeta (450 nm) y un marcado apagado de la fluorescencia frente al fungicida metiltiofanato (TM), con un límite de detección de $0.14 \mu\text{M}$. Además, demostró capacidad de remoción del pesticida carbendazim (CBZ) (figura 6), alcanzando una adsorción de 161.8 mg g^{-1} , muy superior a la de fibras comerciales (Chen et al., 2022; Zhao et al., 2018). El sistema fue validado en frutas, vegetales y agua, mostrando alta selectividad y estabilidad tras múltiples ciclos.

El estudio de los cuatro casos presentados permite englobar de forma general en qué consisten las vertientes en el desarrollo de MOF luminiscentes de Zn(II)

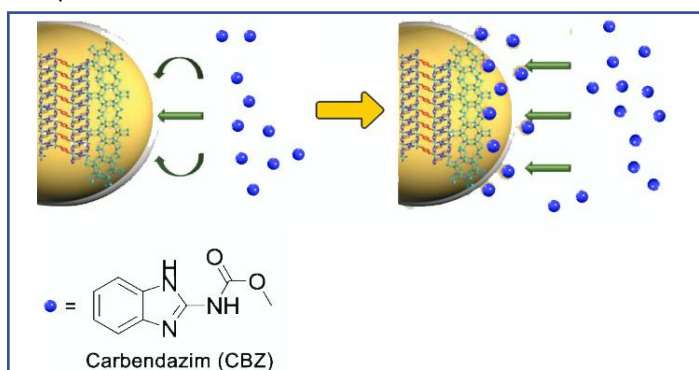


Figura 6. Propuesta del mecanismo de adsorción del pesticida carbendazim por el sistema ZIF-8 en Zn2@SA (imagen modificada de la referencia Chen et al., 2022).

para su aplicación en la detección de pesticidas: 1) partiendo de interacciones débiles de tipo van der Waals directamente con la red, aún en un sistema interpenetrado; 2) a través de interacciones específicas con los grupos funcionales de los ligantes, tales como enlaces de hidrógeno, interacciones π - π o contactos electrostáticos con sitios coordinativamente no saturados o piridinas libres que complementan la geometría del analito; 3) mediante el diseño de receptores del tipo desplazamiento de unidad fluorescente, en el que un fluoróforo huésped con emisión propia se aloja en las cavidades del MOF y su interacción con el pesticida genera una respuesta ratiométrica dual; y, finalmente, 4) en arquitecturas jerárquicas más complejas, como hidrogeles o composites, que al encapsular o soportar la red favorecen la intensidad de la emisión fluorescente por confinamiento e incrementan la selectividad al restringir el acceso al analito a través de la matriz portadora (Hasegawa & Kitagawa, 2022). La tabla 1 reúne ejemplos adicionales de MOF de Zn(II) descritos en la literatura, destacando sus propiedades y desempeño como sensores fluorescentes frente a pesticidas.



Tabla 1. Sensores fluorescentes Zn(II)- MOF para pesticidas y herbicidas en muestras reales

Fórmula	Respuesta	Pesticida /herbicida	Muestra	λ_{em} (nm)	LOD (M o μ M)	Ref.
$\{[Zn(tptc)_{0.5}(bimb)] \cdot H_2O\}_n$ = NUC-6	Apagado	DCN; NFZ; NFT	Agua de río, grifo, extractos vegetales	392	DCN: 4.7×10^{-7} NFZ: 1.1×10^{-7} NFT: 8.0×10^{-8}	(Fan et al., 2020)
$[Zn(TPYBDC) \cdot H_2O]_n$	Apagado	Imidaclo-prid; Dinotefu-ran; Nitenpi-ram	Agua de río, grifo, embotellada	290	0.562; 0.247; 0.441 μ M	(Su et al., 2021)
$\{[Zn(H_4L)(H_2O)_2] \cdot H_2O\}_n$	Apagado	TMTD	Agua simulada	359	0.76 μ M	(Singha et al., 2018)
RhB@Zn- MOF $\{[Zn(TATB)(bimb)] \cdot H_2O\}_n$ + RhB	Ratiométrico (IFE+ FRET)	Diquat (DQ)	Agua de grifo, extractos de manzana	356 / 580	10.5 nM	(Liu et al., 2024)
$[Zn_4(CPTA)_2(\mu_3-OH)_2(H_2O)(DMF)_{0.5}] \cdot 1.5H_2O$	Apagado	Nitenpyram; Nitrofurazona	Agua de riego, lago, río	375	0.625 μ M; 0.126 μ M	(Zhang et al., 2022)
ZIF-8-Zn2@SA	Apagado	Metil-tiofanato y remoción CBZ	Frutas, vegetales, agua	~450	TM: 0.14 μ M CBZ: 161.8 mg g^{-1}	(Chen et al., 2022)
Zn-DBC	Apagado	Paraquat; Diquat	Agua	420	DQ: 2.8 ppm	(He et al., 2012)
CP-1 = $[Zn(PTA)(DTP)(H_2O)_2] \cdot DMF$; CP-2 = $[Zn(BTC)(DTP)] \cdot (CH_3CN)_{1.5} \cdot (H_2O)_4$	Apagado	CP-1: Metamitron; CP-2: Imidaclo-prid	Agua	322	1.61×10^{-7} ; 2.51×10^{-7}	(Singha et al., 2017)
H-ZIF-8@Zn- MOF -74	Adsorción	Clorotalo-nil, Tebuclozol, Clorpyrifos, Butralin, Deltamethrin, Pyridaben	Té y aguas residuales	—	0.021–0.422 μ M	(Zhang et al., 2021)
$[Zn_3(DDB)(DPE)]$	Apagado	DCN	Extractos de zanahoria, nectarinas y uvas	450	2.7×10^{-7} M	(Wang et al., 2019)
$Ru(bpy)_3@ZIF-90-MnO_2$	Apagado	Metil-paration	Agua de grifo, lago; extractos de col	600	1.40×10^{-10} M	(Li et al., 2021)
AuNCs@ZIF-8	Encendido	Acefato	Agua de grifo y lago, extracto de lechuga	600	3.66×10^{-9}	(Zhang et al., 2021)
CBZ-BOD@ZIF-8	Encendido	Clorpyrifos	Células vivas	624	1.6×10^{-7}	(Shen et al., 2021)
1@PMMA (Zn- MOF en membrana de PMMA)	Apagado	ODZ; DCN	Alimentos	—	n.r.	(Gao et al., 2024)

Nota: H_4tptc = ácido p-terphenyl-2,2'',5'',5'''-tetracarboxílico; bimb = 1,3-bis(1-imidazol-1-ilmetil)benzeno; $H_2TPYBDC$ = ácido 4'-(piridin-4-il)-[2,2':6',2''-terpiridina]-4,4''-dicarboxílico; H_4L = 3,5-bis(3',5'-dicarboxifenil)-1H-1,2,4-triazol; H_3TATB = ácido 4,4',4''-(1,3,5-triazina-



2,4,6-triil)tribenzoico; CPTA = ácido 5-(4-carboxifenil)-1H-1,2,4-triazol; Htpt = ácido 2,4,6-tris(4-piridil)-1,3,5-triazina; H₂bdc = ácido tereftálico; SA = alginato de sodio; H₄DBC = ácido 2,7,10,15-tetrakis[2,6-dimetil-4-(α -carboxi)metoxifenil]dibenzo[g,p]criseno; PTA = ácido tereftálico; BTC = ácido benceno-1,3,5-tricarboxílico; DTP = 3,5-di(1,2,4-triazol-1-il)piridina; NTD = ácido naftaleno-1,4-dicarboxílico; DOBDC = ácido 2,5-dihidroxitereftálico; DDB = ácido 3,5-di(2',4'-dicarboxifenil)benzoico; DPE = 1,2-di(4-piridil)etileno; bpy = 2,2'-bipiridina; CBZ-BOD = derivado carbazol-boradiaza aromático; PMMA = Polimetil metacrilato, ODZ = Ornidazol.

CONCLUSIONES

El análisis de las redes luminiscentes centradas en Zn(II) permite reconocer la versatilidad y el potencial de estas arquitecturas para la detección fluorescente de pesticidas y herbicidas en medios acuosos reales. A lo largo de los ejemplos revisados, se ha evidenciado que la estabilidad química, la naturaleza de los ligantes y la posibilidad de incorporar huéspedes fluorescentes son factores determinantes para obtener respuestas analíticas reproducibles y altamente sensibles. Además, estos mof representan algunos prototipos de varias alternativas para alcanzar la selectividad mediante diferentes estrategias: desde interacciones débiles de la red, aprovechando contactos directos con los ligantes, hasta mecanismos más complejos que involucran transferencia de energía o sistemas huésped-anfitrión con una respuesta dual. Esta diversidad de enfoques confirma que los mof de Zn(II) constituyen plataformas flexibles, capaces de adaptarse a distintos analitos y condiciones de matriz, sin perder estabilidad ni capacidad de reutilización.

En cuanto a su aplicabilidad, los límites de detección alcanzados en varios de los mof estudiados se sitúan por debajo de los valores máximos permitidos por las normativas internacionales, lo que refuerza su uso práctico en el monitoreo de agua, alimentos y ambientes agrícolas. La posibilidad de validar estos sensores en muestras reales, con recuperaciones superiores al 90 %, consolida su papel como herramientas analíticas competitiva frente a técnicas convencionales más costosas y menos accesibles.

En conjunto, los avances revisados demuestran que los mof luminiscentes de Zn(II) representan una vertiente emergente y prometedora en el control de contaminantes, ofreciendo soluciones sostenibles y eficientes para la detección de pesticidas y herbicidas. Su desarrollo futuro dependerá de la optimización de la selectividad, la integración de arquitecturas jerárquicas y la exploración



de nuevos ligantes funcionales, con el objetivo de consolidar su impacto en la protección ambiental y la seguridad alimentaria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación a través del Programa "Investigadoras e Investigadores COMECYT 2025", con el folio CAT2025-0066, para la estancia de investigación de LDRV.

REFERENCIAS

- Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1): 1-12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Bhattacharya, R., Chattopadhyay, M. K., Datta, S., & Banerjee, P. (2025). Metal–Organic Frameworks in Action: A Comprehensive Review on Fluoremetric Sensing and Adsorption of Organophosphorus Pesticides. *ChemistrySelect*, 10(28): e202501815. <https://doi.org/10.1002/slct.202501815>
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2): 48-60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Chauhan, A., Chauhan, V., & Goyal, P. (2017). Pesticide residue analysis in food samples using chromatography techniques. *Journal of Analytical Science and Technology*, 8(1): 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40543-017-0120-5>
- Chen, P., Jia, L., Wang, K., & Wang, F. (2025). Fluorescent chemogenetic tags: ligand design and biological applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 545:217031 <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217031>
- Chen, L., Liu, M., Zhang, Y., Qin, J., & Wen, T. (2022). Hierarchical Zn(II) mof hydrogel composites for luminescent sensing and removal of pesticides in water and food. *Small*, 18(45): 2203456. <https://doi.org/10.1002/sml.202203456>
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5): 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>



- Fan, L., Wang, X., Ge, J., Li, F., Wang, L., Wang, S., Chen, S., & Wang, S. (2020). A water stable Zn(II) mof for selective luminescent sensing of pesticides and antibiotics. *Applied Organometallic Chemistry*, 34(5): e5587. <https://doi.org/10.1002/aoc.5587>
- Gao, X., Liu, M., Lei, M., Kong, Y., Xu, X., & Zhang, Q. (2024). A Zn- mof -based mixed matrix membrane as an ultrastable luminescent sensor for selective and visual detection of antibiotics and pesticides in food samples. *Talanta*, 277: 126303. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126303>
- Guo, Z., Xiao, H., & Bu, X. (2013). Luminescent Zn(II) mof s for sensing nitroaromatic explosives. *Chemical Communications*, 49(80): 9133-9135. <https://doi.org/10.1039/c3cc45356a>
- Hasegawa, Y., & Kitagawa, Y. (2022). Luminescent lanthanide coordination polymers with transformative energy transfer processes for physical and chemical sensing applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 51: 100485. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2022.100485>
- He, C., Liu, D., & Lin, W. (2012). Luminescent metal-organic frameworks for sensing applications. *Chemical Society Reviews*, 41(8): 3029-3050. <https://doi.org/10.1039/c1cs15197e>
- Hernández, F., Sancho, J. V., Ibáñez, M., Abad, E., Portolés, T., & Mattioli, L. (2013). Current use of high-resolution mass spectrometry in the environmental sciences. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405(17): 5005-5017. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-6858-7>
- Hu, Z., Deibert, B. J., & Li, J. (2013). Luminescent metal-organic frameworks for chemical sensing. *Chemical Society Reviews*, 43(16): 5815-5840. <https://doi.org/10.1039/c3cs60475f>
- Li, J., Weng, Y., Shen, C., Luo, J., Yu, D., & Cao, Z. (2021). Sensitive fluorescence and visual detection of organophosphorus pesticides with a Ru(bpy)₃²⁺ ZIF-90 MnO₂ sensing platform. *Analytical Methods*, 13(26): 2981-2988. <https://doi.org/10.1039/D1AY00841B>
- Liu, J., Zhang, Y., Wang, H., Li, Q., & Chen, W. (2024). Rhodamine B encapsulated Zn(II) mof as a ratiometric luminescent sensor for bipyridinium herbicides. *Microchemical Journal*, 192: 109873. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109873>
- Lozowicka, B. (2015). Health risk for children and adults consuming apples with pesticide residues in Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(14): 11234-11247. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4337-9>
- Mandal, S., Singha, D. K., Majee, P., Mondal, S. K., & Mahata, P. (2018). Detection of pesticides in aqueous medium and fruit extracts using a three dimensional metal-organic framework: experimental and computational study. *Inorganic Chemistry*, 57(19): 12155-12165. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01767>



- Mnif, W., Hassine, A. I. H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Roig, B. (2011). Effect of endocrine disruptor pesticides: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(6): 2265-2303. <https://doi.org/10.3390/ijerph8062265>
- Mostafalou, S., & Abdollahi, M. (2013). Pesticides and human chronic diseases: evidences, mechanisms, and perspectives. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 268(2): 157-177. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2013.01.025>
- Pimentel, D. (1995). Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 8(1): 17-29. <https://doi.org/10.1007/BF02349034>
- Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). Pesticide productivity and food security. *Agricultural Economics*, 44(3): 1-12. <https://doi.org/10.1111/agec.12027>
- Rosales-Vázquez, L. D., Dorazco-González, A., & Sánchez-Mendieta, V. (2021). Efficient chemosensors for toxic pollutants based on photoluminescent Zn(II) and Cd(II) metal-organic networks. *Dalton Transactions*, 50(13): 4465-4478. <https://doi.org/10.1039/D0DT04403B>
- Singha, D. K., Majee, P., Mondal, S. K., & Mahata, P. (2017). Highly selective aqueous phase detection of azinphos methyl pesticide in ppb level using a cage connected 3D mof. *ChemistrySelect*, 2(20): 5760-5768. <https://doi.org/10.1002/slct.201700963>
- Shen, B., Ma, C., Ji, Y., Dai, J., Li, B., Zhang, X., & Huang, H. (2021). Detection of carboxylesterase 1 and chlorpyrifos with ZIF-8 metal-organic frameworks using a red emission BODIPY based probe. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(7): 8718-8726. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c19811>
- Su, B., Zhao, W., Li, D., Xiao, H., & Wen, W. (2021). A two dimensional Zn(II) mof with uncoordinated pyridyl sites for selective sensing of neonicotinoid pesticides. *Analytical Methods*, 13(12): 1456-1464. <https://doi.org/10.1039/D0AY02234H>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50): 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Wang, X., Feng, D., Tang, J., Zhao, Y., Li, J., Yang, J., Kim, C. K., & Su, F. (2019). A water stable zinc(II) organic framework as a multiresponsive luminescent sensor for toxic heavy metal cations, oxyanions and organochlorine pesticides in aqueous solution. *Dalton Transactions*, 48(44): 16776-16785. <https://doi.org/10.1039/c9dt03195b>
- Zhang, W., Ye, G., Liao, D., Chen, X., Lu, C., Esmailzadeh-Salestani, K., Parsaee, Z., & Khatami, M. (2021). Luminescent Au nanoclusters encapsulated in ZIF-8 as a selective sensor for acephate in water and vegetable extracts. *Analytical Methods*, 13(37): 4219-4226. <https://doi.org/10.1039/D1AY01129F>

- Zhang, W., Hu, Y., Liang, X., & Liu, S. (2022). A Zn(II) triazole mof as a luminescent sensor for nitrofurazone and nitenpyram in water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(12): 3562-3571. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07845>
- Zhao, X., Bu, X., Wu, T., Zheng, S. T., Wang, L., & Feng, P. (2018). Selective anion exchange with nanogated isorecticular positive metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews*, 376: 229-249. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.08.002>