

## **Perspectivas en el desarrollo de sensores químicos ópticos para la identificación de iones metálicos**

*Perspectives in the development of optical chemical sensors for metal  
ions identification*

Homero Chávez Chao<sup>1</sup>, Cesar Garcias Morales<sup>1\*</sup>, Arxel de León Santillán<sup>2</sup>, Eder  
Iván Martínez Mora<sup>1</sup>, Liliana Cantú Sifuentes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas,  
Departamento de Química Orgánica, Blvd. Venustiano Carranza y Cárdenas  
Valdez S/N, Col. República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Cátedras Conacyt-Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique  
Reyna H. 140, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

\*Autor de correspondencia: Cesar Garcias Morales  
Universidad Autónoma de Coahuila

Correo:

[cgarcias@uadec.edu.mx](mailto:cgarcias@uadec.edu.mx)

## Resumen

Este trabajo es una revisión general del desarrollo de sensores químicos ópticos para la detección de metales pesados mediante colorimetría o fluorescencia. Se aborda la problemática que representa la presencia de los iones metálicos en cuerpos de agua, así como los riesgos ambientales y a la salud humana. Adicionalmente, se abordan algunos conceptos fundamentales y reglas empíricas para el diseño inteligente de moléculas con propiedades ópticas deseadas. Por último, se destaca el uso de bases de Schiff o iminas, como sensores orgánicos gracias a su estructura química y las propiedades ópticas, las cuales han permitido detectar concentraciones de hasta  $0.0363 \mu\text{M}$ , siendo una alternativa novedosa con ventajas frente a los métodos tradicionales.

**Palabras clave:** *Sensores ópticos, Iones metálicos, Bases de Schiff, UV-Vis, Fluorescencia.*

## Abstract:

This is a general review of the development of optical chemical sensors for the metal detection using colorimetry or fluorescence. The problem of the metallic ions in water for human consumption is approached, as well as the environmental and human health risks. Additionally, some fundamental concepts and rules for the design of molecules with desired optical properties are discussed. Finally, the use of Schiff bases as organic sensors is stands out due to their chemical structure and optical properties, which have allowed detecting concentrations of  $0.0363 \mu\text{M}$ , being a novel alternative with advantages over traditional detections methods.

**Keyword:** *Optical sensors, metal ions, Schiff bases, UV-Vis, Fluorescence*

## Introducción

Los metales pesados son sustancias altamente tóxicas para la salud humana aun en pequeñas concentraciones debido a su difícil eliminación y fácil bioacumulación en los tejidos y órganos blandos que pueden llegar a provocar fallas en los sistemas biológicos. En la naturaleza hay una gran variedad de metales pesados, no obstante, en bajas concentraciones algunos son esenciales tal es el caso del Cobre (Cu), Selenio (Se), Zinc (Zn) y Hierro (Fe), los cuales son parte fundamental para mantener un buen funcionamiento metabólico en los seres vivos y, en particular, del cuerpo humano (Zhangping Li y col., 2022). Sin embargo, en concentraciones altas pueden considerarse tóxicos pudiendo causar envenenamiento por metales (Méndez y col., 2008). Otros metales pesados como; Plomo (Pb), Níquel (Ni), Cromo (Cr), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Arsénico (As), representan un riesgo a la salud ya que pueden ser altamente tóxicos (Gautam y col., 2014). El envenenamiento causado por metales pesados se da principalmente por la ingesta de agua potable contaminada.

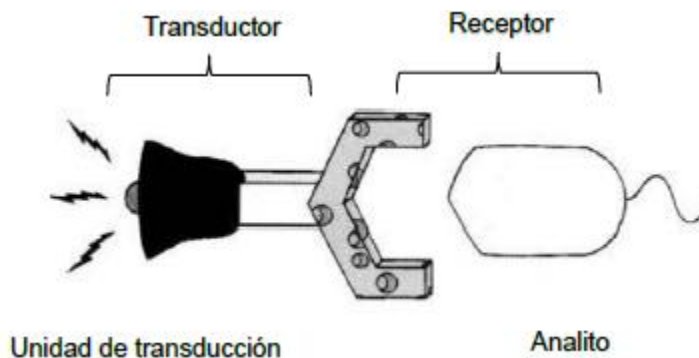
Debido a sus efectos toxicológicos y dañinos, los metales pesados deben ser evitados en el agua para consumo humano, la normatividad mexicana establece en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 algunos criterios para la determinación de estos contaminantes, así como los límites máximos permisibles de estos para mantener la calidad del agua para su consumo (NOM-127-SSA1-1994).

Actualmente las técnicas empleadas para la detección y cuantificación de metales pesados son: espectroscopia de adsorción atómica (AAS) y la espectrometría de masas acoplado plasma (MS-ISP). Dentro de las ventajas de estas técnicas se puede destacar que tienen límites de detección muy bajos, alta confiabilidad y precisión, por lo que la cuantificación de los metales es muy exacta. Sin embargo, también tienen algunas desventajas como su alto costo de análisis y largo tiempo

para la preparación de la muestra, aunado a que se requiere de personal altamente calificado para la manipulación de estos equipos. En respuesta a esta problemática, se están desarrollando nuevas tecnologías para la detección de metales pesados en agua para consumo humano las cuales son de bajo costo y, sobre todo, de fácil funcionamiento, con límites de detección similares a las técnicas espectroscópicas y una respuesta inmediata en un corto tiempo de análisis (Kuswandi y col., 2022). Estas especificaciones las pueden reunir los sensores químicos orgánicos, quienes utilizan las propiedades ópticas como la fluorescencia o colorimetría que indican la presencia o no de metales en una muestra, además pueden reconocer selectivamente iones metálicos aun a bajas concentraciones en solución acuosa.

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), un sensor químico se puede definir como *“dispositivo que transforma la información química, que va desde la concentración de una muestra en específico hasta el análisis completo de la misma, a una señal analítica útil. Dicha información química puede provenir de una reacción química entre el sensor y el analito o de una propiedad física del sistema que se está investigando”* (Hulanicki y col., 1991).

Un sensor está conformado principalmente por dos partes (Figura 1), la primera se trata del *receptor*, el cual se encarga del reconocimiento y acomplejamiento del metal. Es la región de la molécula que está en contacto con el analito de manera selectiva, y transforma esta información química en energía. La información en forma de energía o estímulo es captada por la segunda parte del sensor denominada *transductor*, el cual se encarga de transformar dicha energía cargada por la información química en una señal analítica la cual puede ser interpretada de forma simple, a este proceso se le denomina transducción (Sinclair, 2001).



**Figura 1.** Esquema general y partes de un sensor químico (Fabbrizzi & Poggi, 1995).

Los sensores químicos orgánicos son capaces de identificar cambios de pH, iones, gases e incluso puntualmente una especie química, además de dar una señal analítica inmediata y de fácil interpretación. El campo de aplicación puede ir desde el monitoreo medioambiental, uso en procesos industriales, análisis de composición de agua y gases; todo esto sin la necesidad de utilizar robustos y costosos equipos.

### Clasificación de Sensores Químicos

De acuerdo al mecanismo de transducción es posible clasificar a los sensores químicos en seis grupos: a) *ópticos*, se asocian a las propiedades medibles de la luz; b) *electroquímicos*, asociados a las mediciones potenciométricas y voltamétrica de las sustancias; c) *eléctricos*, los cuales son capaces de identificar las especies dúctiles como óxidos y semiconductores orgánicos; d) *sensibles a la masa*, por ejemplo, dispositivos piezoeléctricos y dispositivos de onda acústica; e) *magnéticos*, basados en propiedades paramagnéticas de los gases; f) *térmicos*, basados en el efecto calorífico de una reacción química con el analito (Hulanicki y col., 1991). Los sensores químicos ópticos por su parte representan una gran ventaja sobre los demás ya que son fáciles de preparar y utilizar. La señal que proporcionan es fácil de interpretar por lo que son especialmente útiles para identificar contaminantes de una solución en tiempo real.

Los sensores químicos ópticos utilizan la luz del espectro electromagnético desde la región ultravioleta hasta la infrarroja para detectar interacciones químicas con el analito en solución o en estado sólido. Estos tipos de sensores se clasifican de acuerdo con el mecanismo de transducción en el que se basan en la absorbancia, dispersión, difracción, reflectancia, refracción, fotoluminiscencia, quimioluminiscencia, electroluminiscencia o bioluminiscencia (Zheng Li y col., 2019). La absorbancia y la fluorescencia son los dos mecanismos de transducción más efectivos.

### Características estructurales de un sensor químico óptico

El reconocimiento de metales por un sensor químico óptico se lleva a cabo a través de la coordinación ya sea por interacciones dipolares o puentes de hidrógeno, por lo que en la estructura química del sensor se deben incluir heteroátomos, los cuales poseen pares de electrones libres que coordinan al ion metálico por lo que actúan como receptores. Además, es importante que en la estructura del sensor se incorporen grupos cromóforos y/o auxocromos, los cuales funcionan como transductores que convierten la coordinación a una señal visible fácil de interpretar (Yadav, 2018). Como se ilustra en la Figura 2, los grupos funcionales como aminas o hidroxilos son los responsables de actuar como receptores del ion  $\text{Cu}^{2+}$  formando enlaces de coordinación, mientras que dobles enlaces o anillos aromáticos actúan como transductor proporcionando una señal óptica debido al sistema  $\pi$ -conjugado.



**Figura 2.** Funcionamiento de un sensor fluorescente selectivo a  $\text{Cu}^{2+}$  (Guo y col., 2019)

El reconocimiento molecular de los iones metálicos se puede dar a través de distintas interacciones como la coordinación o acomplejamiento e interacciones de Van Der Waals, que a su vez dependen de los grupos funcionales que posea la molécula. La principal función del receptor en un sensor químico es crear sitios de unión para coordinar el ion metálico. Las especies metálicas con radios atómicos más pequeños y geometrías estructurales simples favorece la coordinación. Los heteroátomos como oxígeno, nitrógeno y azufre son excelentes receptores debido a sus pares de electrones libres ya que permiten la coordinación con los iones metálicos (Espinosa Maldonado, 2019).

En el sensor químico orgánico los grupos cromóforos son los encargados de transformar la información química de la coordinación del ion a una señal visible a través de un cambio cromático o la aparición de fluorescencia. El cambio de color se debe principalmente a la formación de complejos de transferencia de cargas intramoleculares (ICT) que provocan un reordenamiento de la densidad electrónica, mientras que la fluorescencia se puede apagar o prender debido a cambios de los canales de relajación en la molécula al excitar un electrón del orbital HOMO hacia el orbital LUMO, la energía absorbida corresponderá a una regio en el espectro visible (Yadav, 2018).

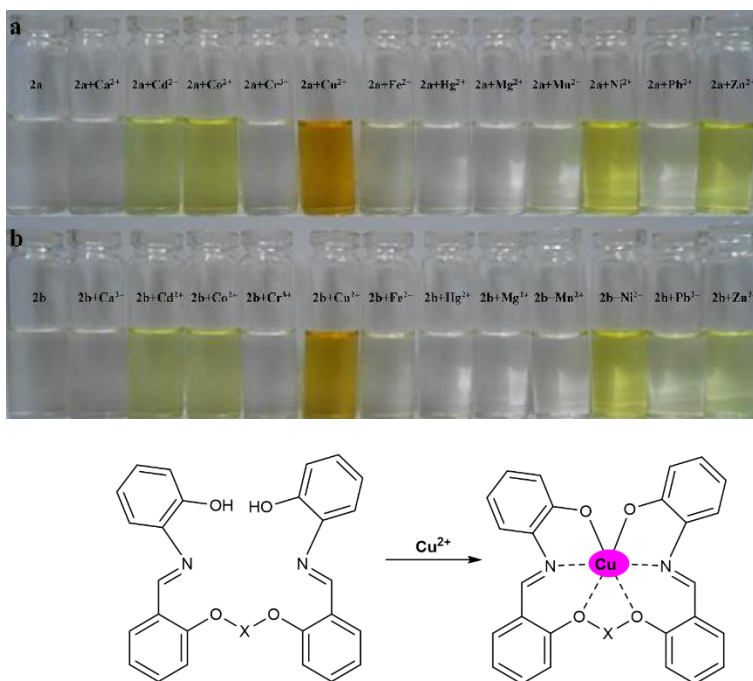
### **Aplicaciones de sensores químicos**

Algunos sensores químicos orgánicos han sido empleados en la detección de gases explosivos derivados del ácido pícrico, TNP, TNT, DNP y NT (X. Huang y col., 2022). Por otra parte, se han desarrollado sensores capaces de detectar moléculas biológicas con el fin de ser usados como marcadores de enfermedades (Day & Wilmer, 2021; Lee y col., 2018; Markwalter y col., 2019), sensores de solventes y compuestos orgánicos volátiles los cuales son contaminantes atmosféricos emitidos por la actividad industrial y automotriz (Zhao y col., 2022) y contaminantes en

alimentos (El-Feky y col., 2022). Otros sensores derivados de aminas son utilizados en gran medida para la detección de aniones, los cuales son compuestos empleados como oxidantes en laboratorios e industrias como el  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  y  $\text{MnO}_4^-$  entre otros, además de la detección de metales pesados (Skorjanc y col., 2021).

### Detección de metales pesados

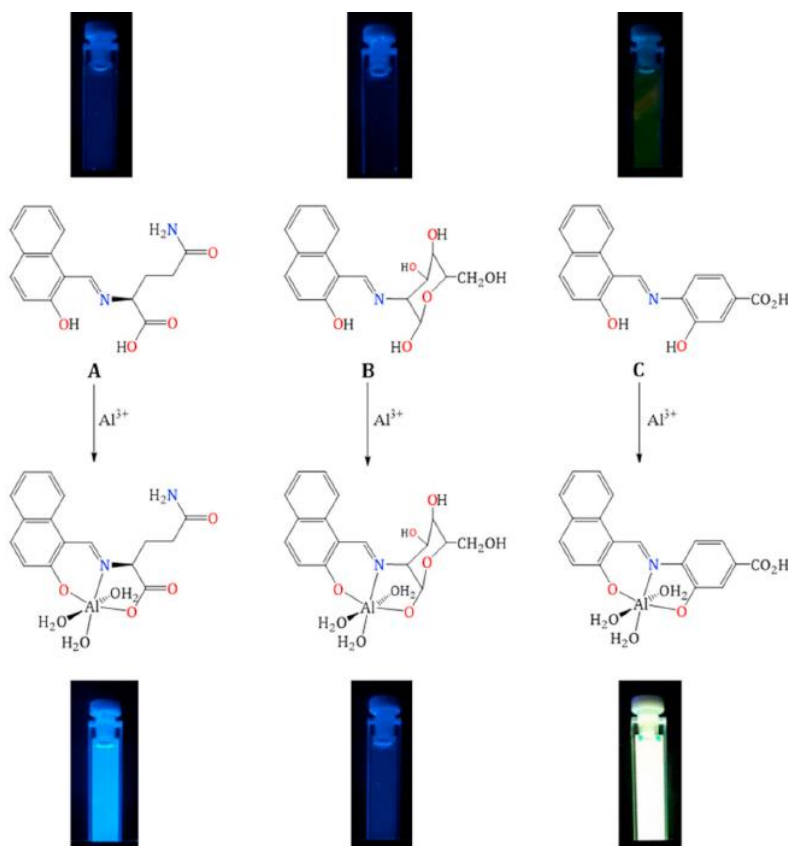
Gupta y colaboradores desarrollaron dos moléculas orgánicas a partir del Di(O-salicilaldimino-*o*-hidroxifenil)alcano, capaces de detectar iones metálicos a través de un cambio de color de una disolución, por ejemplo, la muestra que contiene el sensor es incolora y se torna de color marrón en presencia de  $\text{Cu}^{2+}$  y amarillo en presencia de  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  (Figura 3). El límite de detección del sensor fue de  $1.0 \times 10^{-6}$  M para  $\text{Cu}^{2+}$  y  $1.0 \times 10^{-5}$  M para  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ . Siendo altamente selectivos para las especies mencionadas sobre otros iones metálicos (Gupta y col., 2013).



**Figura 3.** Pruebas de selectividad de los sensores. a) 1,2-Di(O-salicilaldimino-*o*-hidroxifenil)etano y b) 1,3-di(O-salicilaldimino-*o*-hidroxifenil)propano; c) Estructura química y posible modelo de unión con iones de  $\text{Cu}^{2+}$  (Gupta y col., 2013).



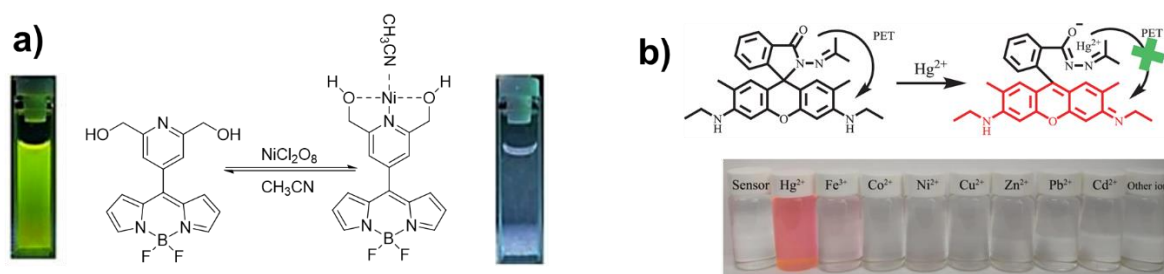
Por otra parte, Berrones-Reyes y colaboradores, desarrollaron tres sensores fluorescentes que podían detectar  $\text{Al}^{3+}$  con una alta selectividad y sensibilidad sobre otros iones metálicos en solución acuosa (Figura 4). El método de transducción de estos sensores es a través de la aparición de fluorescencia en presencia de  $\text{Al}^{3+}$  con un límite de detección de 0.103, 0.317 y 0.091  $\mu\text{M}$  respectivamente (Berrones-Reyes y col., 2019).



**Figura 4.** Mecanismo de fluorescencia de los sensores en presencia de  $\text{Al}^{3+}$  bajo UV a 365 nm (Berrones-Reyes y col., 2019).

Huang y colaboradores reportaron la síntesis de un quimiosensor fluorescente basado en la estructura BODIPY- $\text{NO}_2$  (Figura 5a), con el cual pudieron detectar selectivamente  $\text{Ni}^{2+}$ , con un límite de detección de  $1.7 \times 10^{-7} \text{ M}$  y una constante de

asociación ( $K_a$ ) de  $3.1 \times 10^5$  M (P. J. Huang y col., 2021). Por otra parte Qu y colaboradores, reportan la síntesis de rodamina 6G (Figura 5b) que funciona como sensor colorimétrico selectivo a  $Hg^{2+}$  (Qu y col., 2020). Por su parte Abebe, reporta un derivado de la rodamina empleado como sensor de  $Cu^{2+}$  utilizando fluorescencia, destacando que la detección se realizó empleando una mezcla de acetonitrilo: agua (Abebe y col., 2020). Trejo-Huizar reportan la síntesis de derivados de la 3-hidroxi-4(1H)-quinolona, como sensores fluorescentes de  $Al^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$  y  $Me_2Sn^{2+}$  (Trejo-Huizar y col., 2020). Liu y colaboradores desarrollaron un sensor fluorescente selectivo a  $Zn^{2+}$  el cual consiste en un ligando tridentado a base de imidazol-piridina-imidazol (**Py2IM**) (Liu y col., 2020). Estos resultados muestran una perspectiva muy interesante en el desarrollo para emplear quimiosensores en la detección de iones metálicos.

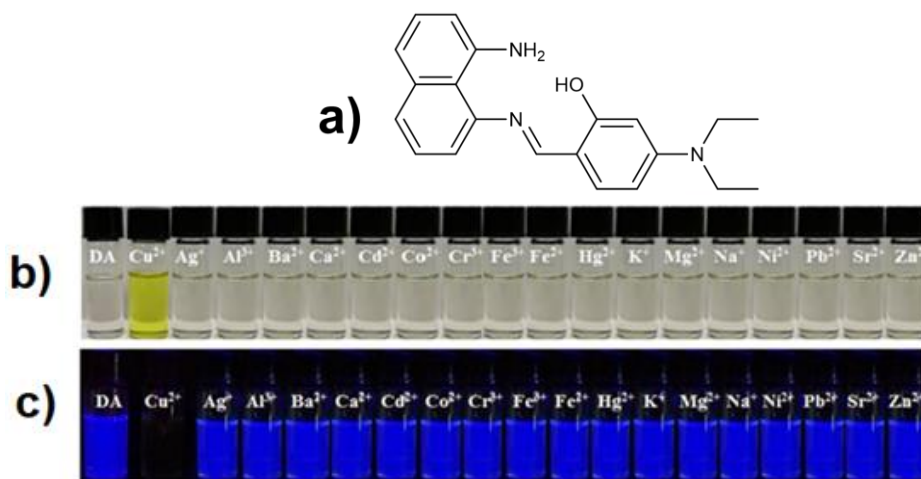


**Figura 5.** A) Quimiosensor basado en molécula BODIPY-NO<sub>2</sub> para la detección selectiva de Ni<sup>2+</sup>, b) Quimiosensor derivado de rodamina para la detección selectiva de Hg<sup>2+</sup> (imagen adaptada de Huang y col., 2021; Qu y col., 2020).

### Sensibilidad y selectividad en sensores químicos orgánicos ópticos

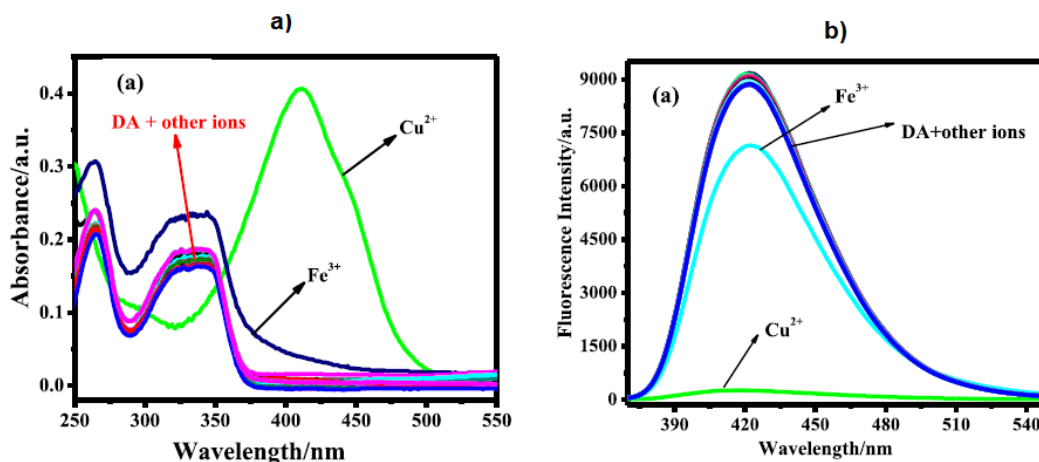
Una de las propiedades más importantes de un sensor químico orgánico es la *selectividad*, la cual se define como la capacidad del sensor para detectar únicamente una especie química en presencia de varias especies con propiedades similares, es decir, puede reconocer y discriminar diferentes especies como se puede apreciar en la Figura 6. El 1,8-diaminonaftaleno ha sido empleado como

sensor óptico altamente selectivo en la detección del ion  $\text{Cu}^{2+}$  aun en la presencia de varios cationes metálicos ( $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ). Se trata de un sensor colorimétrico ya que va acompañado de un cambio de color al estar en presencia de  $\text{Cu}^{2+}$  a diferencia de cuando interacciona con los demás metales donde no se observa un cambio de color.- Además, el sensor es fluorescente en solución cuando se excita con un láser a 352 nm, sin embargo, la fluorescencia se pierde únicamente en presencia del  $\text{Cu}^{2+}$  (Figura 6).



**Figura 6.** a) Estructura molecular del sensor 1,8-diaminonaftaleno DA; b) Señal colorimétrica del sensor para la detección de cobre en solución; c) Pérdida de la fluorescencia en presencia de  $\text{Cu}^{2+}$  en solución (Guo y col., 2019).

La selectividad de un sensor químico óptico se determina mediante los espectros de absorbancia y fluorescencia (Figura 7). Esto generalmente se lleva a cabo utilizando una solución madre de los metales que se desean detectar a concentraciones idénticas.



**Figura 7.** Espectros de a) Absorbancia y b) Fluorescencia de un sensor óptico de  $\text{Cu}^{2+}$  en una disolución madre de  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  y  $\text{Cu}^{2+}$  (1.0 mM) en DMSO/ $\text{H}_2\text{O}$  (3:7, V/V)

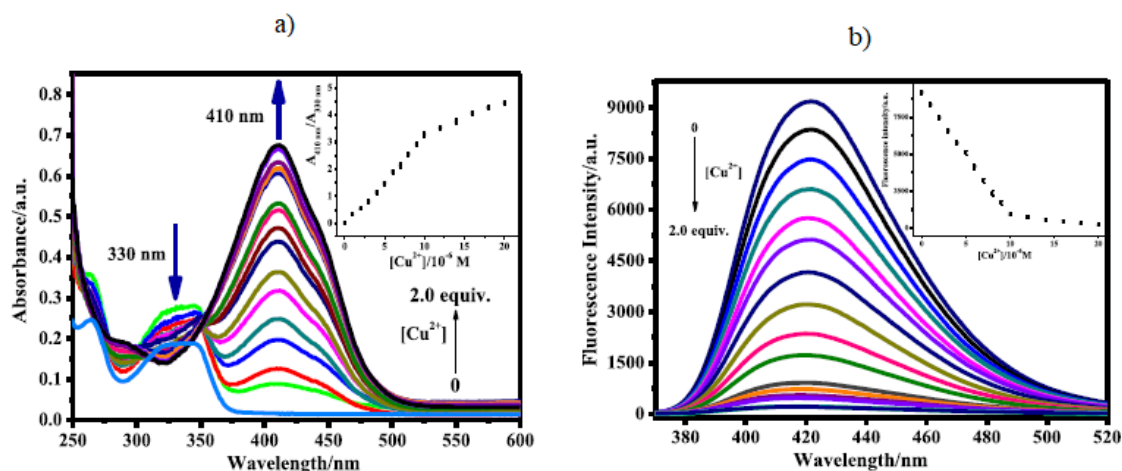
(Guo y col., 2019).

Otra característica importante en un sensor químico es la *sensibilidad*, la cual se refiere a la cantidad mínima de analito que un sensor puede detectar y transformar en una señal visible o detectable. En los sensores orgánicos la sensibilidad permite la detección del analito a muy bajas concentraciones, es decir, que posea límites de detección lo suficientemente bajos para especies en cantidades trazas incluso en concentraciones de 0.5 nM (Ghosh y col., 2022).

La determinación de la sensibilidad depende del método de transducción, a través de los espectros de absorbancia o fluorescencia. Por medio de una titulación utilizando el metal bajo estudio como solución titulante y empleando las ecuaciones de Benesi-Hildebrand se puede obtener la constante de asociación-disociación ( $K_a$ ).

La determinación del límite de detección de 1,8-diaminonaftaleno (DA) empleado para censar iones  $\text{Cu}^{2+}$ , se llevó a cabo mediante la titulación de la molécula

utilizando una solución 0.001M de  $\text{Cu}^{2+}$ , los espectros de UV-Vis se muestran en la Figura 8a. En este se observó que la adición de iones de cobre a la disolución provoca una disminución o aumento respectivamente hasta un punto de saturación del ligando, lo que indica la formación de un complejo entre el DA (sensor) y  $\text{Cu}^{2+}$ . Por último, a través del cálculo de la constante de unión metal-ligando y el ajuste lineal de la absorbancia al aumentar la concentración de iones  $\text{Cu}^{2+}$  se puede determinar el límite de detección de este analito (Guo y col., 2019).



**Figura 8.** a) Titulación de absorbancia UV-vis del sensor DA (10 mM) con una concentración creciente de  $\text{Cu}^{2+}$  (0-2.0 equiv.); b) Titulación de fluorescencia UV-vis del sensor DA (10 mM) tras la adición de  $\text{Cu}^{2+}$  (0-2.0 equiv.) (Guo y col., 2019).

### Determinación de la constante de coordinación y límite de detección

La constante de asociación ( $K_a$ ) para la formación de complejos se evalúa utilizando la ecuación de Benesi-Hildebrand a partir de los datos de titulación de absorbancia y fluorescencia UV-vis.

$$\frac{1}{A-A_0} = \frac{1}{A_{\max}+A_0} + \frac{1}{K_a(A_{\max}-A_0)[M^{n+}]^m} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\frac{1}{I - I_0} = \frac{1}{I_{max} - I_0} + \frac{1}{Ka (I_{max} - I_0) [M^{n+}]^m} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $A_0$  es la absorbancia del sensor,  $A$  es la absorbancia del sensor en presencia de una concentración particular de iones metálicos, mientras que  $A_{max}$  es la absorbancia máxima de sensor o ligando en presencia de un exceso de iones metálicos (ecuación 1). De manera similar,  $I_0$  es la intensidad de emisión del sensor en ausencia de metal,  $I$  es la intensidad de emisión del sensor en presencia de concentraciones intermedias del ion metálico, por último  $I_{max}$  es la intensidad de emisión máxima del sensor en presencia de un exceso de iones metálicos (Das y col., 2019). La determinación del límite de detección se calcula a partir de la titulación anterior y de la ecuación 3.

$$LOD = \frac{3\sigma}{\kappa} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la medición del blanco, y  $\kappa$  es la pendiente entre la intensidad de la emisión o absorción contra la concentración del metal  $[M^{n+}]$  (Das y col., 2019).

### **Bases de Schiff empleadas como sensores ópticos de metales pesados en medio acuoso.**

Las bases de Schiff o iminas han sido ampliamente estudiadas como sensores químicos debido a que son fáciles de preparar. Una característica particularmente importante de las bases de Schiff es que se pueden sintetizar moléculas con sistemas  $\pi$ -conjugado y este se puede modificar con facilidad manteniendo el par libre del nitrógeno disponible para la coordinación de iones metálicos.

Las interacciones químicas entre las iminas mediante el par de electrones libre (LPE) y los iones metálicos en solución acuosa es la razón por la cual se ha explorado el uso de estos sensores. Las interacciones imina-metal llevan a la formación de transferencias de cargas donador-aceptor ( $nLPE \rightarrow M^+$ ), que modifican las propiedades ópticas, colorimétricas, fluorescentes o electroquímicas de la

molécula las cuales son fáciles de percibir. Varios procesos como la transferencia de carga por resonancia de fluorescencia, la formación de excímero-excíplex, la transferencia de protones intramoleculares en estado excitado y la transferencia de electrones fotoinducida están incluidos en la modificación de las propiedades ópticas (Berhanu y col., 2019).

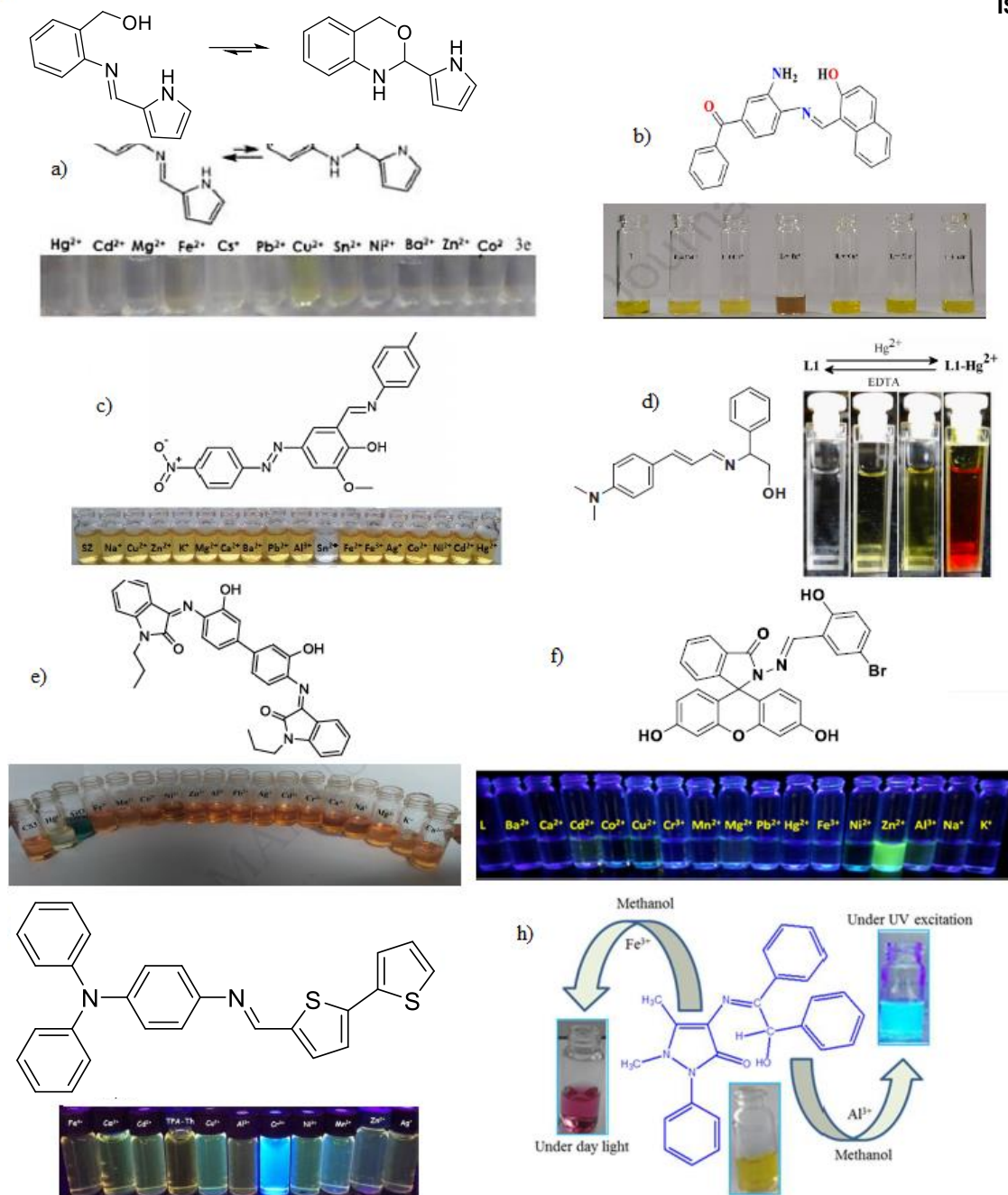
En las iminas el sistema  $\pi$ -conjugado actúa como transductor, ya que al entrar en contacto con el ion metálico provoca un reordenamiento en la densidad electrónica modificando la absorción de la luz UV-Vis, lo que provoca un cambio de color en la molécula (Garcias-Morales y col., 2021).

Se han desarrollado una larga lista de sensores químicos ópticos a partir de las bases de Schiff, así pues, en la literatura se ha reportado la síntesis de una serie de iminas para la detección de metales pesados en medio acuoso, algunos ejemplos de estas son enlistadas en la Tabla 1 y en la Figura 9.

**Tabla 1.** Comparación de diferentes bases de Schiff empleados como quimiosensores

Base de Schiff	Método de detección	Selectividad	$K_a$ ( $M^{-1}$ )	Límite de detección	Referencia
2-(((1H-pirrol-2-il) metileno) amino)fenil) metanol	Colorimétrico	$Cu^{2+}$	$8.24 \times 10^3$	$4.9 \times 10^{-6} M$	(Garcias-Morales y col., 2021)
Sonda a base de Benzofenona	Colorimétrico	$Fe^{2+}$	$6.173 \times 10^7$	$0.0363 \mu M$	(Kouser y col., 2021)
2-metoxi-6-((E)-[(4-metilfenil)imino]metil)-4-[(E)-(4-nitrofenil)diazetil]fenol	Colorimétrico	$Sn^{2+}$	$4.195 \times 10^3$	$0.754 \mu M$	(Dongare y col., 2020)
L1	Fluorescente	$Hg^{2+}$	$6.94 \times 10^5$	$3.15 \times 10^{-6} M$	(Jiménez-Sánchez y col., 2013)
(3Z, 3'Z)-3, 3'-((3,3'-dihidroxi-[1,1'-bifenil]-4,4'-diil) bis (azanililideno)) bis (1-propilindolin-2-ona)	Colorimétrico	$Hg^{2+}$ y $As^{3+}$	$4.94 \times 10^9$ y $1.53 \times 10^8$	$3.93 \mu M$ y $7.51 \mu M$	(TG y col., 2019)
L	Fluorescente	$Zn^{2+}$	$2.86 \times 10^4$	$1.59 \mu M$	(Das y col., 2019)
TPA-Th	Fluorescente	$Cr^{3+}$	$2.8 \times 10^4$	$1.5 \times 10^{-6}$	(Kolcu y col., 2020)
1,5-dimetil-4-(2-hidroxi-1,2-difeniletilidenoamino)-2-fenilpirazol-3-ona	Colorimétrico / Fluorescente	$Fe^{3+}/Al^{3+}$	$4.34 \times 10^6 /$ $4.53 \times 10^4$	No reportado	(Gupta y col., 2014)





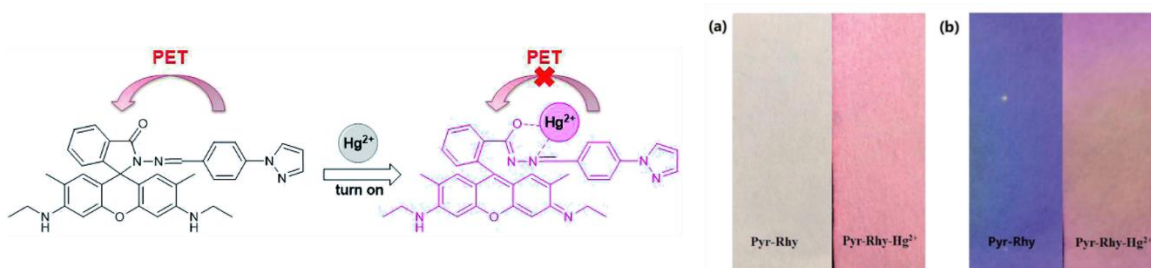
**Figura 9.** Estructura química y señal óptica emitida por los sensores químicos colorimétricos y fluorescentes; a) 2-(((1H-pirrol-2-yl)methylene)amino)phenyl)ethanol; b) Sonda a base de Benzofenona; c) 2-methoxy-6-((E)-[(4-methylphenyl)imino]methyl)-4-((E)-(4-nitrophenyl)diazene)methyl)phenol; d) L1; e) (3Z,3'Z)-3,3'-((3,3'-dihydroxy-[1,1'-biphenyl]-4,4'-diyl)bis(azanilideno))bis(1-propylindolin-2-one); f) L; g) TPA-Th; h) 1,5-dimethyl-4-

(2-hidroxi-1,2-difenil-etilideno-amino)-2-fenilpirazol-3-ona. (imagen adaptada de Garcias-Morales y col., 2021; Kouser y col., 2021; Dongare y col., 2020; Jiménez-Sánchez y col., 2013; Das y col., 2019; Kolcu y col., 2020; Gupta y col., 2014)

### Dispositivos desarrollados (tiras de papel impregnadas con el sensor químico)

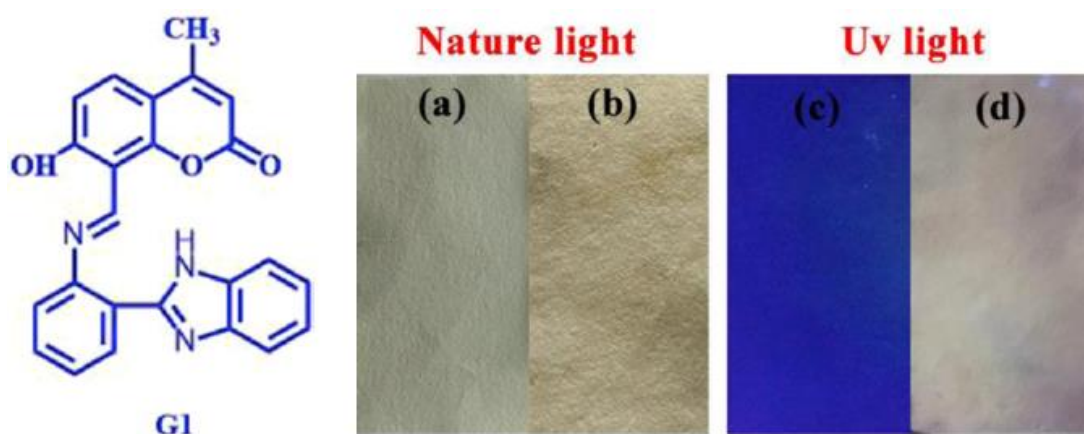
Un método empleado para el desarrollo de dispositivos basados en sensores químicos colorimétricos, son pruebas instantáneas de respuesta inmediata basadas en tiras de papel impregnadas con el sensor, las cuales facilitan la detección del analito. Además, su funcionamiento es simple, ya que al entrar en contacto el analito con el papel se observa un cambio de coloración o emisión de fluorescencia bajo una lámpara UV (Kuswandi y col., 2022).

Yang y colaboradores llevaron a cabo la síntesis de un quimiosensor basado en un derivado de rodamina (**Pyr-Rhy**) para detección de  $Hg^{2+}$  en agua a través de la fluorescencia, el sensor es altamente selectivo con un límite de detección de  $2.07 \times 10^{-8}$  M. Sin embargo, lo más destacado del trabajo resultó cuando impregnaron papel filtro con **Pyr-Rhy**, la prueba sumergiendo el papel en una solución acuosa de  $Hg^{2+}$  reveló un cambio en el color del papel, indicando su potencial aplicación para la detección de este metal en muestras ambientales (Yang y col., 2019).



**Figura 10.** Fotografía que muestra el cambio de color del sensor **Pyr-Rhy** antes y después de la adición de  $Hg^{2+}$  (a) bajo la luz del sol y (b) irradiado a 365 nm con luz UV (Yang y col., 2019).

Zhi-Yuan Yin y colaboradores sintetizaron un sensor óptico fluorescente derivado de la cumarina G1 capaz de detectar  $\text{Fe}^{3+}$  en solución acuosa, acompañado de un cambio de color de amarillo a naranja, con un aumento en la fluorescencia; el límite de detección del sensor en fluorescencia es  $4.88 \times 10^{-7}$  M en una solución DMSO/ $\text{H}_2\text{O}$  (1:1 v/v). Para ampliar la aplicación del sensor se realizaron experimentos con tiras reactivas de papel impregnadas con una disolución de G1 en DMSO/ $\text{H}_2\text{O}$  (1:9, v/v, pH = 7,2) posterior al secado se pusieron en contacto con una disolución de  $\text{Fe}^{3+}$ , donde se observó un cambio de color y emisión de fluorescencia en ambientes oscuros o bajo una lámpara UV (Figura 11) (Yin y col., 2020).



**Figura 11.** Estructura química del sensor G1. Pruebas de cambio de color y fluorescencia en luz natural; a) Tira con G1; b) Tira con G1 tratado con  $\text{Fe}^{3+}$ ; y bajo una lámpara UV c) Tira con G1; d) Tira con G1 tratado con  $\text{Fe}^{3+}$  (Yin y col., 2020).

## Conclusión

Los sensores orgánicos ópticos han demostrado ser muy atractivos para la determinación de metales pesados en diferentes medios, siendo el más importante

en medio acuoso, además pueden detectar concentraciones muy bajas (0.5 nm) y pueden llegar a ser altamente selectivos. Una de sus principales ventajas es la forma de transducción, ya que se da por medios ópticos, en general, hay un cambio de color, lo que permite tener un análisis cualitativo de forma instantánea sin el uso de equipos costosos.

Las iminas o bases de Schiff resultan ser moléculas atractivas como sensores ópticos debido a que tienen ciertas ventajas frente a otras moléculas, ya que son de fácil preparación y su síntesis es económica. Las características fisicoquímicas de las aminas las hacen ideales para la detección de iones metálicos como contaminantes por su alta selectividad del analito aun en una matriz acuosa; otra característica importante es que presentan diferentes límites de detección, por lo regular, menores a los establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas. Por último, el desarrollo de dispositivos como tiras de papel que actúan como indicadores de diferentes especies nos permiten la posibilidad de que pronto tengamos esta tecnología para comercializar en un futuro cercano.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila por las instalaciones prestadas, así como los medios informáticos. Este trabajo fue realizado con recursos propios.

## Referencias

Abebe, F., Perkins, P., Shaw, R., & Tadesse, S. (2020). A rhodamine-based fluorescent sensor for selective detection of Cu<sup>2+</sup> in aqueous media: Synthesis and spectroscopic properties. *Journal of Molecular Structure*, 1205(2), 127594. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127594>

- Berhanu, A. L., Gaurav, Mohiuddin, I., Malik, A. K., Aulakh, J. S., Kumar, V., & Kim, K. H. (2019). A review of the applications of Schiff bases as optical chemical sensors. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 116, 74–91.  
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.04.025>
- Berrones-Reyes, J., Muñoz-Flores, B. M., Gómez-Treviño, A., Treto-Suárez, M. A., Páez-Hernández, D., Schott, E., Zarate, X., & Jiménez-Pérez, V. M. (2019). Novel fluorescent Schiff bases as Al<sup>3+</sup> sensors with high selectivity and sensitivity, and their bioimaging applications. *Materials Chemistry and Physics*, 233(January), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.035>
- Das, B., Jana, A., Mahapatra, A. Das, Chattopadhyay, D., Dhara, A., Mabhai, S., & Dey, S. (2019). Fluorescein derived Schiff base as fluorimetric zinc (II) sensor via ‘turn on’ response and its application in live cell imaging. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 212, 222–231.  
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.12.053>
- Day, B. A., & Wilmer, C. E. (2021). Computational Design of MOF-Based Electronic Noses for Dilute Gas Species Detection: Application to Kidney Disease Detection. *ACS Sensors*, 6(12), 4425–4434.  
<https://doi.org/10.1021/acssensors.1c01808>
- Dongare, P. R., Gore, A. H., & Ajalkar, B. D. (2020). A dual colorimetric chemosensor based on Schiff base for highly selective and simultaneous recognition of CN<sup>-</sup> and Sn<sup>2+</sup>. *Inorganica Chimica Acta*, 502, 119372.  
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.119372>
- El-Feky, H. H., El-Bahy, S., & Amin, A. S. (2022). Sensitive optical thin film sensor based on incorporation of 2-(2'-hydroxynaphthylazo)-benzothiazole in a sol-gel matrix for detection of manganese(II) in environmental samples. *Analytical Biochemistry*, 651, 114720.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ab.2022.114720>

- Espinosa Maldonado, J. E. (2019). *Síntesis y Caracterización Estructural de Iminas y su Uso como Sensores Químicos de Metales Pesados en Agua*. Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas.
- Fabbrizzi, L., & Poggi, A. (1995). Sensors and switches from supramolecular chemistry. *Chemical Society Reviews*, 24(3), 197–202.  
<https://doi.org/10.1039/CS9952400197>
- Garcias-Morales, C., Espinosa Maldonado, J., Ariza Castolo, A., Perez Berumen, C. M., Lobato, M. A., Rodriguez, M. A., & Espinoza Roa, A. (2021). Synthesis and physicochemical characterization of Schiff bases used as optical sensor for metals detection in water. *Journal of Molecular Structure*, 1228, 129444.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129444>
- Gautam, R. K., Sharma, S. K., Mahiya, S., & Chattopadhyaya, M. C. (2014). CHAPTER 1. Contamination of Heavy Metals in Aquatic Media: Transport, Toxicity and Technologies for Remediation. *Heavy Metals In Water, October*, 1–24. <https://doi.org/10.1039/9781782620174-00001>
- Ghosh, S., Dissanayake, K., Asokan, S., Sun, T., Rahman, B. M. A., & Grattan, K. T. V. (2022). Lead (Pb<sup>2+</sup>) ion sensor development using optical fiber gratings and nanocomposite materials. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 364, 131818. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131818>
- Guo, Z., Niu, Q., Li, T., & Wang, E. (2019). Highly chemoselective colorimetric/fluorometric dual-channel sensor with fast response and good reversibility for the selective and sensitive detection of Cu<sup>2+</sup>. *Tetrahedron*, 75(30), 3982–3992. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2019.06.019>
- Gupta, V. K., Singh, A. K., Ganjali, M. R., Norouzi, P., Faridbod, F., & Mergu, N. (2013). Comparative study of colorimetric sensors based on newly synthesized Schiff bases. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 182, 642–651.

<https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.03.062>

- Gupta, V. K., Singh, A. K., & Mergu, N. (2014). Antipyrine based Schiff bases as Turn-on Fluorescent sensors for Al (III) ion. *Electrochimica Acta*, 117, 405–412. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.143>
- Huang, P. J., Kumarasamy, K., Devendhiran, T., Chen, Y. C., Dong, T. Y., & Lin, M. C. (2021). BODIPY-based hydroxypyridyl derivative as a highly Ni<sup>2+</sup>-selective fluorescent chemosensor. *Journal of Molecular Structure*, 1246, 131281. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131281>
- Huang, X., Gong, Z., & Lv, Y. (2022). Advances in metal-organic frameworks-based gas sensors for hazardous substances. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 153, 116644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116644>
- Hulanicki, A., Glab, S., & Ingman, F. (1991). Chemical sensors definitions and classification. *Pure and Applied Chemistry*, 63(9), 1247–1250. <https://doi.org/10.1351/pac199163091247>
- Jiménez-Sánchez, A., Farfán, N., & Santillan, R. (2013). A reversible fluorescent-colorimetric Schiff base sensor for Hg<sup>2+</sup> ion. *Tetrahedron Letters*, 54(39), 5279–5283. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2013.07.072>
- Kolcu, F., Erdener, D., & Kaya, İ. (2020). A Schiff base based on triphenylamine and thiophene moieties as a fluorescent sensor for Cr (III) ions: Synthesis, characterization and fluorescent applications. *Inorganica Chimica Acta*, 509(January). <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119676>
- Kouser, R., Zehra, S., Khan, R. A., Alsalme, A., Arjmand, F., & Tabassum, S. (2021). “Turn-on” benzophenone based fluorescence and colorimetric sensor for the selective detection of Fe<sup>2+</sup> in aqueous media: Validation of sensing mechanism by spectroscopic and computational studies. *Spectrochimica Acta*

- *Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 247, 119156.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119156>

Kuswandi, B., Hidayat, M. A., & Noviana, E. (2022). Paper-based sensors for rapid important biomarkers detection. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 100246.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100246>

Lee, M. Y., Lee, H. R., Park, C. H., Han, S. G., & Oh, J. H. (2018). Organic Transistor-Based Chemical Sensors for Wearable Bioelectronics. *Accounts of Chemical Research*, 51(11), 2829–2838.

<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00465>

Li, Zhangping, Hou, J.-T., Wang, S., Zhu, L., He, X., & Shen, J. (2022). Recent advances of luminescent sensors for iron and copper: Platforms, mechanisms, and bio-applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 469, 214695.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214695>

Li, Zheng, Askim, J. R., & Suslick, K. S. (2019). The Optoelectronic Nose: Colorimetric and Fluorometric Sensor Arrays [Review-article]. *Chemical Reviews*, 119(1), 231–292. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00226>

Liu, J., Wang, S., Li, W., Dong, Y., Wang, J., Song, Q., & Zhang, C. (2020). A novel imidazole-based tri-nitrogen metal cations probe with better-selectivity in ionic radius and acting as a Zn<sup>2+</sup> fluorescence turn-on sensor. *Journal of Molecular Structure*, 1222. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128909>

Markwalter, C. F., Kantor, A. G., Moore, C. P., Richardson, K. A., & Wright, D. W. (2019). Inorganic Complexes and Metal-Based Nanomaterials for Infectious Disease Diagnostics. *Chemical Reviews*, 119(2), 1456–1518.

<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00136>

Méndez, P., Ramírez, G., César, A., Gutiérrez, R., Alma, D., & García, P. (2008). Plant Contamination and Phytotoxicity Due To Heavy Metals From Soil and



Water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 19–44.

NOM-127-SSA1-1994. (n.d.).

Qu, Z., Meng, X., Duan, H., Qin, D., & Wang, L. (2020). Rhodamine-immobilized optical hydrogels with shape deformation and Hg<sup>2+</sup>-sensitive fluorescence behaviors. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64549-5>

Sinclair, I. R. (2001). *Sensors and Transducers* Third edition. *Elsevier*, 319.

Skorjanc, T., Shetty, D., & Valant, M. (2021). Covalent Organic Polymers and Frameworks for Fluorescence-Based Sensors. *ACS Sensors*. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00183>

TG, A. K., Tekuri, V., Mohan, M., & Trivedi, D. R. (2019). Selective colorimetric chemosensor for the detection of Hg<sup>2+</sup> and arsenite ions using Isatin based Schiff's bases; DFT Studies and Applications in test strips. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 284, 271–280. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.003>

Trejo-Huizar, K. E., Jiménez-Sánchez, A., & Yatsimirsky, A. K. (2020). Composition, stability and fluorescence properties of metal complexes of an aza-flavonol analog 1-methyl-2-phenyl-3-hydroxy-4(1H)-quinolone in aqueous solution. *Inorganica Chimica Acta*, 505(December 2019), 119471. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119471>

Yadav, L. D. S. (2018). ORGANIC SPECTROSCOPY. In *e-conversion - Proposal for a Cluster of Excellence*.

Yang, G., Meng, X., Fang, S., Duan, H., Wang, L., & Wang, Z. (2019). A highly selective colorimetric fluorescent probe for detection of Hg<sup>2+</sup> and its application on test strips. *RSC Advances*, 9(15), 8529–8536.

<https://doi.org/10.1039/c9ra00797k>

Yin, Z. Y., Hu, J. H., Gui, K., Fu, Q. Q., Yao, Y., Zhou, F. L., Ma, L. L., & Zhang, Z. P. (2020). AIE based colorimetric and “turn-on” fluorescence Schiff base sensor for detecting Fe<sup>3+</sup> in an aqueous media and its application. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 396(January), 112542.

<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112542>

Zhao, D., Yu, S., Jiang, W.-J., Cai, Z.-H., Li, D.-L., Liu, Y.-L., & Chen, Z.-Z. (2022). Recent Progress in Metal-Organic Framework Based Fluorescent Sensors for Hazardous Materials Detection. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 7).

<https://doi.org/10.3390/molecules27072226>

Abebe, F., Perkins, P., Shaw, R., & Tadesse, S. (2020). A rhodamine-based fluorescent sensor for selective detection of Cu<sup>2+</sup> in aqueous media: Synthesis and spectroscopic properties. *Journal of Molecular Structure*, 1205(2), 127594. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127594>

Berhanu, A. L., Gaurav, Mohiuddin, I., Malik, A. K., Aulakh, J. S., Kumar, V., & Kim, K. H. (2019). A review of the applications of Schiff bases as optical chemical sensors. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 116, 74–91.

<https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.04.025>

Berrones-Reyes, J., Muñoz-Flores, B. M., Gómez-Treviño, A., Treto-Suárez, M. A., Páez-Hernández, D., Schott, E., Zarate, X., & Jiménez-Pérez, V. M. (2019). Novel fluorescent Schiff bases as Al<sup>3+</sup> sensors with high selectivity and sensitivity, and their bioimaging applications. *Materials Chemistry and Physics*, 233(January), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.035>

Das, B., Jana, A., Mahapatra, A. Das, Chattopadhyay, D., Dhara, A., Mabhai, S., & Dey, S. (2019). Fluorescein derived Schiff base as fluorimetric zinc (II) sensor via ‘turn on’ response and its application in live cell imaging. *Spectrochimica*

*Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 212, 222–231.  
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.12.053>

Day, B. A., & Wilmer, C. E. (2021). Computational Design of MOF-Based Electronic Noses for Dilute Gas Species Detection: Application to Kidney Disease Detection. *ACS Sensors*, 6(12), 4425–4434.  
<https://doi.org/10.1021/acssensors.1c01808>

Dongare, P. R., Gore, A. H., & Ajalkar, B. D. (2020). A dual colorimetric chemosensor based on Schiff base for highly selective and simultaneous recognition of CN<sup>-</sup> and Sn<sup>2+</sup>. *Inorganica Chimica Acta*, 502, 119372.  
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.119372>

El-Feky, H. H., El-Bahy, S., & Amin, A. S. (2022). Sensitive optical thin film sensor based on incorporation of 2-(2'-hydroxynaphthylazo)-benzothiazole in a sol-gel matrix for detection of manganese(II) in environmental samples. *Analytical Biochemistry*, 651, 114720.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ab.2022.114720>

Espinosa Maldonado, J. E. (2019). *Síntesis y Caracterización Estructural de Iminas y su Uso como Sensores Químicos de Metales Pesados en Agua*. Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas.

Fabbrizzi, L., & Poggi, A. (1995). Sensors and switches from supramolecular chemistry. *Chemical Society Reviews*, 24(3), 197–202.  
<https://doi.org/10.1039/CS9952400197>

Garcias-Morales, C., Espinosa Maldonado, J., Ariza Castolo, A., Perez Berumen, C. M., Lobato, M. A., Rodriguez, M. A., & Espinoza Roa, A. (2021). Synthesis and physicochemical characterization of Schiff bases used as optical sensor for metals detection in water. *Journal of Molecular Structure*, 1228, 129444.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129444>

- Gautam, R. K., Sharma, S. K., Mahiya, S., & Chattopadhyaya, M. C. (2014).  
CHAPTER 1. Contamination of Heavy Metals in Aquatic Media: Transport,  
Toxicity and Technologies for Remediation. *Heavy Metals In Water, October*,  
1–24. <https://doi.org/10.1039/9781782620174-00001>
- Ghosh, S., Dissanayake, K., Asokan, S., Sun, T., Rahman, B. M. A., & Grattan, K.  
T. V. (2022). Lead (Pb<sup>2+</sup>) ion sensor development using optical fiber gratings  
and nanocomposite materials. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 364,  
131818. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131818>
- Guo, Z., Niu, Q., Li, T., & Wang, E. (2019). Highly chemoselective  
colorimetric/fluorometric dual-channel sensor with fast response and good  
reversibility for the selective and sensitive detection of Cu<sup>2+</sup>. *Tetrahedron*,  
75(30), 3982–3992. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2019.06.019>
- Gupta, V. K., Singh, A. K., Ganjali, M. R., Norouzi, P., Faridbod, F., & Mergu, N.  
(2013). Comparative study of colorimetric sensors based on newly  
synthesized Schiff bases. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 182, 642–651.  
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.03.062>
- Gupta, V. K., Singh, A. K., & Mergu, N. (2014). Antipyrine based Schiff bases as  
Turn-on Fluorescent sensors for Al (III) ion. *Electrochimica Acta*, 117, 405–  
412. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.143>
- Huang, P. J., Kumarasamy, K., Devendhiran, T., Chen, Y. C., Dong, T. Y., & Lin,  
M. C. (2021). BODIPY-based hydroxypyridyl derivative as a highly Ni<sup>2+</sup>-  
selective fluorescent chemosensor. *Journal of Molecular Structure*, 1246,  
131281. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131281>
- Huang, X., Gong, Z., & Lv, Y. (2022). Advances in metal-organic frameworks-  
based gas sensors for hazardous substances. *TrAC Trends in Analytical  
Chemistry*, 153, 116644.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116644>

Hulanicki, A., Glab, S., & Ingman, F. (1991). Chemical sensors definitions and classification. *Pure and Applied Chemistry*, 63(9), 1247–1250.

<https://doi.org/10.1351/pac199163091247>

Jiménez-Sánchez, A., Farfán, N., & Santillan, R. (2013). A reversible fluorescent-colorimetric Schiff base sensor for Hg 2+ ion. *Tetrahedron Letters*, 54(39), 5279–5283. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2013.07.072>

Kolcu, F., Erdener, D., & Kaya, İ. (2020). A Schiff base based on triphenylamine and thiophene moieties as a fluorescent sensor for Cr (III) ions: Synthesis, characterization and fluorescent applications. *Inorganica Chimica Acta*, 509(January). <https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119676>

Kouser, R., Zehra, S., Khan, R. A., Alsalme, A., Arjmand, F., & Tabassum, S. (2021). “Turn–on” benzophenone based fluorescence and colorimetric sensor for the selective detection of Fe<sup>2+</sup> in aqueous media: Validation of sensing mechanism by spectroscopic and computational studies. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 247, 119156. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119156>

Kuswandi, B., Hidayat, M. A., & Noviana, E. (2022). Paper-based sensors for rapid important biomarkers detection. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 100246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100246>

Lee, M. Y., Lee, H. R., Park, C. H., Han, S. G., & Oh, J. H. (2018). Organic Transistor-Based Chemical Sensors for Wearable Bioelectronics. *Accounts of Chemical Research*, 51(11), 2829–2838. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00465>

Li, Zhangping, Hou, J.-T., Wang, S., Zhu, L., He, X., & Shen, J. (2022). Recent advances of luminescent sensors for iron and copper: Platforms, mechanisms,

and bio-applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 469, 214695.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214695>

- Li, Zheng, Askim, J. R., & Suslick, K. S. (2019). The Optoelectronic Nose: Colorimetric and Fluorometric Sensor Arrays [Review-article]. *Chemical Reviews*, 119(1), 231–292. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00226>
- Liu, J., Wang, S., Li, W., Dong, Y., Wang, J., Song, Q., & Zhang, C. (2020). A novel imidazole-based tri-nitrogen metal cations probe with better-selectivity in ionic radius and acting as a Zn<sup>2+</sup> fluorescence turn-on sensor. *Journal of Molecular Structure*, 1222. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128909>
- Markwalter, C. F., Kantor, A. G., Moore, C. P., Richardson, K. A., & Wright, D. W. (2019). Inorganic Complexes and Metal-Based Nanomaterials for Infectious Disease Diagnostics. *Chemical Reviews*, 119(2), 1456–1518. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00136>
- Méndez, P., Ramírez, G., César, A., Gutiérrez, R., Alma, D., & García, P. (2008). Plant Contamination and Phytotoxicity Due To Heavy Metals From Soil and Water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 19–44.
- NOM-127-SSA1-1994. (n.d.).
- Qu, Z., Meng, X., Duan, H., Qin, D., & Wang, L. (2020). Rhodamine-immobilized optical hydrogels with shape deformation and Hg<sup>2+</sup>-sensitive fluorescence behaviors. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64549-5>
- Sinclair, I. R. (2001). *Sensors and Transducers* Third edition. Elsevier, 319.
- Skorjanc, T., Shetty, D., & Valant, M. (2021). Covalent Organic Polymers and Frameworks for Fluorescence-Based Sensors. *ACS Sensors*. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00183>

- TG, A. K., Tekuri, V., Mohan, M., & Trivedi, D. R. (2019). Selective colorimetric chemosensor for the detection of Hg<sup>2+</sup> and arsenite ions using Isatin based Schiff's bases; DFT Studies and Applications in test strips. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 284, 271–280.  
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.003>
- Trejo-Huizar, K. E., Jiménez-Sánchez, A., & Yatsimirsky, A. K. (2020). Composition, stability and fluorescence properties of metal complexes of an aza-flavonol analog 1-methyl-2-phenyl-3-hydroxy-4(1H)-quinolone in aqueous solution. *Inorganica Chimica Acta*, 505(December 2019), 119471.  
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.119471>
- Yadav, L. D. S. (2018). ORGANIC SPECTROSCOPY. In *e-conversion - Proposal for a Cluster of Excellence*.
- Yang, G., Meng, X., Fang, S., Duan, H., Wang, L., & Wang, Z. (2019). A highly selective colorimetric fluorescent probe for detection of Hg<sup>2+</sup> and its application on test strips. *RSC Advances*, 9(15), 8529–8536.  
<https://doi.org/10.1039/c9ra00797k>
- Yin, Z. Y., Hu, J. H., Gui, K., Fu, Q. Q., Yao, Y., Zhou, F. L., Ma, L. L., & Zhang, Z. P. (2020). AIE based colorimetric and “turn-on” fluorescence Schiff base sensor for detecting Fe<sup>3+</sup> in an aqueous media and its application. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 396(January), 112542.  
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112542>
- Zhao, D., Yu, S., Jiang, W.-J., Cai, Z.-H., Li, D.-L., Liu, Y.-L., & Chen, Z.-Z. (2022). Recent Progress in Metal-Organic Framework Based Fluorescent Sensors for Hazardous Materials Detection. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 7).  
<https://doi.org/10.3390/molecules27072226>