

## Materiales tipo pirocloro: Estructura, propiedades y su potencial en la degradación de tintes orgánicos

## Pyrochlore-type materials: Structure, properties and their potential in organic dye degradation

M. F. Ramírez Ayala <sup>a,\*</sup>, J. León Flores <sup>a</sup>, J. L. Pérez Mazariego <sup>a</sup>, M. G. Quintana García <sup>a</sup>, J. J. C. Quintanar Sierra <sup>a</sup>, R. Hinojosa Nava <sup>a</sup>, M. L. Marquina Fábrega <sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

### Resumen

El creciente requerimiento de agua limpia y potable ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas para la remoción de contaminantes en aguas residuales, especialmente los tintes utilizados en la industria textil, conocidos por sus efectos nocivos para la salud humana y el ecosistema. En este contexto, la fotocatalisis heterogénea destaca como una estrategia para la degradación de moléculas orgánicas persistentes, aunque el desafío radica en obtener fotocatalizadores eficientes que operen bajo irradiación de luz visible. Entre los diversos materiales promisorios, los pirocloros se destacan como compuestos multifuncionales con aplicaciones ambientales relevantes, particularmente en la degradación de tintes orgánicos mediante irradiación UV-Visible. Esta revisión aborda la estructura, las propiedades fisicoquímicas y los recientes avances en la síntesis y uso de pirocloros como fotocatalizadores, además de discutir los retos actuales y las perspectivas futuras en el diseño de estos materiales.

### Palabras Clave:

Pirocloro, fotocatalizador, luz visible, tintes orgánicos, tratamiento de agua, estructura cristalina

### Abstract

The increasing demand for clean water has driven the development of advanced technologies for the remediation of wastewater contaminants, particularly dyes used in the textile industry, which are known for their harmful effects on human health and the ecosystem. In this context, heterogeneous photocatalysis stands out as a promising strategy for the degradation of persistent organic molecules, although the challenge lies in obtaining efficient photocatalysts that operate under visible light irradiation. Among the promising materials, pyrochlores have emerged as multifunctional compounds with relevant environmental applications, particularly in the degradation of organic dyes under visible irradiation. This review addresses the structure, physicochemical properties, and recent advances in the synthesis and use of pyrochlores as photocatalysts, as well as discussing current challenges and future perspectives in the design of these materials.

### Keywords:

Pyrochlore, photocatalyst, visible light, organic dyes, water treatment, crystal structure

## 1. Introducción

La contaminación del agua por compuestos orgánicos persistentes representa uno de los desafíos ambientales más apremiantes a nivel global (Belousov *et al.*, 2024). Dentro de estos contaminantes, los tintes orgánicos han cobrado particular relevancia debido a su amplio uso en sectores industriales como el textil, alimenticio, farmacéutico y cosmético (Veiga *et al.*, 2024). Estos compuestos representan una preocupación significativa, ya que su alta estabilidad química y su persistencia en el medio ambiente dificultan su eliminación mediante métodos convencionales de tratamiento de aguas. Por esta razón, el desarrollo de estrategias eficientes para la eliminación de estos

tintes en aguas residuales se presenta como un reto crítico en el ámbito de la limpieza ambiental.

En este contexto, se han explorado diversas tecnologías para abordar la problemática, destacándose los Procesos de Oxidación Avanzada (AOP por sus siglas en inglés) como alternativas prometedoras (Belousov *et al.*, 2024), (Veiga *et al.*, 2024). Estos procesos están fundamentados en la generación de especies reactivas como el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), capaces de oxidar y mineralizar compuestos orgánicos en condiciones ambientales. Entre estas tecnologías, la fotocatalisis heterogénea ha demostrado ser una de las más versátiles y eficientes, al emplear semiconductores que, al ser irradiados con luz, generan pares de electrón-hueco que inducen reacciones redox superficiales (Friedmann *et al.*, 2022). No obstante, el desafío principal radica

\*Autor para la correspondencia: fernandaramirez@ciencias.unam.mx

Correo electrónico: fernandaramirez@ciencias.unam.mx (María Fernanda Ramírez Ayala), jleon@ciencias.unam.mx (Jesús Alberto León Flores), mazariego@ciencias.unam.mx (José Luis Pérez Mazariego), manuel Quintana@ciencias.unam.mx (Manuel Gerardo Quintana García), carlos Quintanar@ciencias.unam.mx (José Jesús Carlos Quintanar Sierra), hinro36@ciencias.unam.mx (Roberto Hinojosa Nava), mmarquina@ciencias.unam.mx (María Luisa Marquina Fábrega)

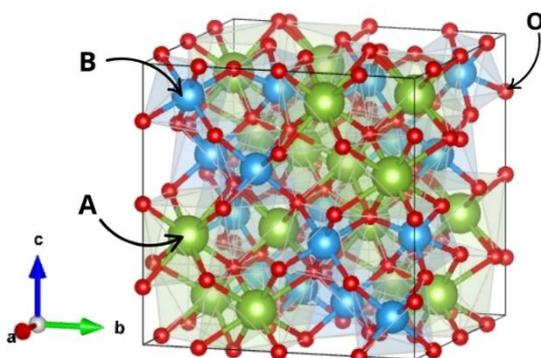
en el desarrollo de fotocatalizadores que sean altamente activos y estables. El diseño y optimización de estos fotocatalizadores depende críticamente de su estructura electrónica, de la movilidad de sus portadores de carga y la capacidad de interacción superficial del material (Belousov *et al.*, 2024).

Ante esta limitación, en años recientes, los materiales tipo pirocloro han recibido atención como sistemas promisorios para aplicaciones fotocatalíticas (Kaviyarasu *et al.*, 2020), (Fukina *et al.*, 2021), (Sun *et al.*, 2022), (Koryagin *et al.*, 2023), (Siddikha *et al.*, 2024). Su estructura cúbica altamente simétrica, basada en la fórmula general  $A_2B_2O_7$  permite una gran variedad de sustituciones catiónicas, lo que habilita el ajuste fino de sus propiedades electrónicas y ópticas (Wang *et al.*, 2023). Gracias a esa estructura versátil, los pirocloros permiten modificar la dinámica de los pares electrón-hueco al incorporar diversos elementos en su composición, lo que favorece la absorción de luz visible y, por ende, mejora la eficiencia fotocatalítica (Luan *et al.*, 2006) (Torres-Martínez *et al.*, 2012), (Veiga *et al.*, 2024).

Otros sistemas como las perovskitas, óxidos binarios o heteroestructuras han sido ampliamente estudiados, mientras que la literatura dedicada a pirocloros como fotocatalizadores visibles es escasa. En este sentido, el presente artículo tiene como objetivo proporcionar una visión general sobre la estructura, propiedades fisicoquímicas, rutas de síntesis y desempeño fotocatalítico de materiales tipo pirocloro para la degradación de tintes orgánicos. Se discuten algunos de los avances más recientes en la materia, así como los desafíos actuales y las perspectivas futuras en el diseño de estos materiales.

## 2. Pirocloros – Estructura cristalina

Los materiales tipo pirocloro pertenecen a una clase de óxidos ternarios con fórmula general  $A_2B_2O_7$ , donde A suele ser un catión trivalente (habitualmente un lantánido, como  $La^{3+}$ ,  $Nd^{3+}$ ,  $Gd^{3+}$  o  $Y^{3+}$ ), y B un catión tetravalente (como  $Ti^{4+}$ ,  $Sn^{4+}$ ,  $Zr^{4+}$  o  $Ru^{4+}$ ), siempre y cuando se satisfagan los criterios de neutralidad de carga y compatibilidad de radios iónicos (Figura 1). Estos compuestos cristalizan en el grupo espacial  $Fd\bar{3}m$ , y se caracterizan por una celda cúbica unitaria que contiene 88 átomos. Una de sus principales ventajas es su notable flexibilidad composicional, que permite la sustitución parcial o total de los sitios A y B, posibilitando la modulación fina de sus propiedades estructurales y electrónicas (Subramanian *et al.*, 1983).

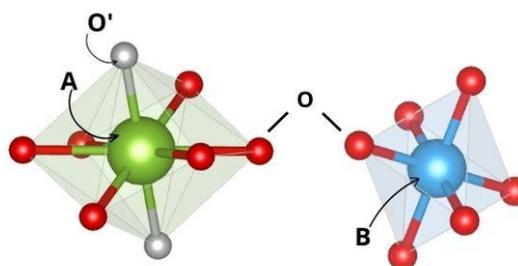


**Figura 1:** Representación cristalográfica de  $A_2B_2O_7$  (Momma *et al.*, 2011).

### 2.1. Red de pirocloro y desorden estructural

La estructura pirocloro está conformada por dos subredes: la primera, en la que los átomos de oxígeno se encuentran en sitios

estructurales que rodean al catión A, y la segunda por octaedros ligeramente distorsionados con el catión B en el centro (Figura 2). Estas distorsiones, junto con la presencia de vacancias en sitios intersticiales 8b, que en la estructura fluorita son ocupados por un oxígeno. Las vacancias otorgan a la estructura una gran estabilidad térmica y química, así como una alta capacidad de transporte iónico. En muchos casos, el grado de orden-desorden puede modificarse mediante condiciones de síntesis, dopaje o sustitución catiónica, lo que repercute directamente en propiedades como la conductividad iónica, la diversidad en la distribución de carga y la actividad catalítica (Tokura *et al.*, 2025).



**Figura 2:** Esquema de la geometría de coordinación del sitio A, con átomos O y O', y del sitio B, con átomos O (Momma *et al.*, 2011).

## 3. Propiedades fisicoquímicas destacadas

Los óxidos con estructura tipo pirocloro poseen una combinación singular de características fisicoquímicas que los posiciona como materiales con aplicaciones en fotocatalisis. Estas propiedades derivan directamente de su estructura cristalina, defectos estructurales y composición química.

- **Estabilidad térmica y química:** Una de las cualidades más destacadas de estos materiales es su notable estabilidad frente a condiciones extremas de temperatura y pH, lo cual resulta fundamental para aplicaciones en tratamiento de aguas residuales que pueden implicar ambientes corrosivos. Esta estabilidad se atribuye a su red cúbica, en la cual los iones A y B están coordinados de manera que se maximiza la simetría y se minimiza la energía libre del sistema (Zhang *et al.*, 2022).
- **Defectos estructurales y vacancias de oxígeno:** La presencia de vacancias de oxígeno en estos materiales puede ser controlada mediante el dopaje o tratamiento térmico, y desempeña un papel esencial en la actividad fotocatalítica. Las vacancias pueden actuar como sitios activos para la adsorción de moléculas contaminantes o de especies oxidantes, y facilitan la generación y transporte de electrones y huecos durante la irradiación lumínica (Veiga *et al.*, 2024).
- **Modulación de la banda prohibida ( $E_g$ ):** El ajuste de la composición química en los sitios catiónicos A y B permite modificar el valor de  $E_g$  de los pirocloros. Esta parte es crucial, ya que posibilita la interacción con la radiación en la región visible, lo cual es esencial para maximizar la eficiencia en aplicaciones fotocatalíticas. En este sentido, las diferencias en la electronegatividad y la configuración electrónica de los cationes A y B influyen directamente en la superposición de los

orbitales moleculares y en la densidad electrónica y, por ende, en el valor de  $E_g$  (Zhu et al., 2021).

- *Transporte de carga y naturaleza del semiconductor:* Varios compuestos tipo pirocloro exhiben un comportamiento de semiconductor tipo n, caracterizado por una movilidad predominante de electrones. Esta característica es vital para la fotocatalisis, ya que favorece la separación de los pares electrón-hueco generados durante la fotoexcitación (De los Santos et al., 2015).
- *Área superficial y porosidad:* Aunque no todos los pirocloros poseen áreas superficiales altas en comparación con materiales mesoporosos convencionales, estos pueden diseñarse para exhibir porosidad y una distribución adecuada de tamaño de poro. La síntesis controlada, incluyendo el uso de precursores específicos, puede influir en la morfología y la textura superficial. De tal manera que al tener una mayor área superficial y una porosidad interconectada facilitan la adsorción de tintes y la difusión de las especies reactivas, promoviendo una degradación más eficiente (Jayaraman et al., 2020).
- *Comportamiento magnético:* El comportamiento magnético intrínseco de algunos óxidos tipo pirocloro, con cationes B como Fe, Mn, Ru o incluso lantánidos ( $Gd^{3+}$ ,  $Dy^{3+}$ ), puede variar desde paramagnetismo hasta vidrio de espín o antiferromagnetismo frustrado, dependiendo de la geometría de la red y el acoplamiento magnético entre los sitios B (Subramanian et al., 1983). Esto permitiría su recuperación, reutilización y su respuesta ante campos magnéticos externos.

#### 4. Rutas de síntesis convencionales

La síntesis de pirocloros puede realizarse mediante diversos métodos que permiten controlar ciertas características clave como la pureza de fase, grado de cristalinidad, el tamaño de partícula, la morfología, entre otras. La elección del método influye directamente en el comportamiento funcional del material, especialmente cuando se busca optimizar su desempeño en aplicaciones fotocatalíticas. En esta sección se describen las principales rutas de síntesis empleadas en la obtención de pirocloros, resaltando las condiciones experimentales típicas, los precursores utilizados y las posibles propiedades del producto final (Kimura et al., 2011), (Džurišić et al., 2020), (Wang et al., 2023).

- *Estado sólido:* Consiste en la mezcla estequiométrica de precursores inorgánicos, como óxidos o carbonatos de los cationes A y B, seguido de un proceso de molienda. Posteriormente, se sinteriza a temperaturas entre 1100 a 1500 °C y un intervalo de tiempo de 10 a 24 horas. Si bien se favorece la obtención de fases cristalinas definidas, los productos suelen presentar un tamaño de partícula micrométrico, baja área superficial y morfología heterogénea. A pesar de estas limitaciones, es un método ampliamente empleado por su bajo costo, y reproducibilidad.
- *Pechini Sol – gel:* Alternativa de síntesis en vía húmeda en donde se emplean nitratos metálicos como precursores, los cuales forman complejos metálicos con el ácido cítrico y se polimeriza en presencia de etilenglicol para formar un gel homogéneo. Los productos presentan una alta cristalinidad, partículas de tamaño nanométrico y morfología homogénea. Este

método permite obtener la formación de la fase pirocloro a  $T < 1100$  °C y facilita la incorporación de dopantes, aunque requiere un control estricto de la proporción metal : ácido : etilenglicol.

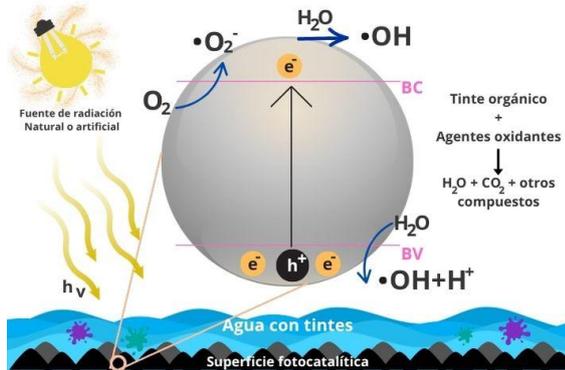
- *Combustión asistida:* Consiste en una reacción redox rápida entre agentes oxidantes, como nitratos metálicos, y combustibles orgánicos, como la urea o la glicina, que ocurre a una temperatura de ignición aproximada de 500 °C. Esta técnica genera una liberación súbita de gases y energía térmica, lo que facilita la formación instantánea del pirocloro con tamaños de partícula inferiores a 50 nm. El método de combustión es valorado por su rapidez y bajo consumo energético.
- *Hidrotermal:* Consiste en la reacción de soluciones precursoras en un medio alcalino (NaOH o KOH) dentro de una autoclave, bajo temperaturas entre 150 – 220 °C. El producto presenta alta cristalinidad, partículas de tamaño inferior a 100 nm y control homogéneo en la morfología. No obstante, requiere tiempos prolongados de reacción y control de la presión.
- *Coprecipitación:* Esta ruta consiste en mezclar soluciones acuosas de precursores metálicos, como nitratos o cloruros, y añadir una base fuerte (NaOH o  $NH_4OH$ ) para inducir la precipitación simultánea de hidróxidos metálicos. El precipitado resultante se lava, seca y posteriormente se calcina a temperaturas entre 700 y 900 °C, para favorecer la formación de la fase pirocloro. El material obtenido presenta partículas de tamaño nanométrico (~ 50 – 80 nm), buena dispersión, elevada cristalinidad y una incorporación homogénea de dopantes. La eficiencia del proceso depende de variables como el pH, la relación molar de iones metálicos y el tiempo de envejecimiento del precipitado.
- *Sales fundidas:* Consiste en el empleo de una mezcla eutéctica de sales inorgánicas —como NaCl-KCl o  $Na_2SO_4$ - $K_2SO_4$ — como medio de reacción para favorecer la formación de óxidos complejos. Típicamente, se emplean óxidos o carbonatos como precursores de los cationes A y B, que se mezclan con las sales en proporciones específicas y se someten a tratamiento térmico en el intervalo de 700 a 1000 °C durante varias horas. Tras este tratamiento, las sales se eliminan mediante un lavado con agua destilada, y el polvo obtenido se deja secar al aire. La alta movilidad iónica en el medio fundido promueve reacciones más rápidas y a temperaturas menores en comparación con la ruta tradicional de estado sólido, lo que favorece la formación de la fase pirocloro bien cristalizada. El producto presenta una distribución de tamaño homogénea, baja aglomeración, cristalinidad elevada y alta pureza de fase.

#### 5. Fotocatalisis heterogénea en pirocloros

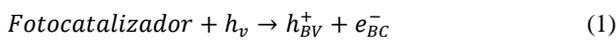
La fotocatalisis heterogénea es un proceso fotoinducido que ocurre en la superficie de un semiconductor (Figura 3) cuando este es excitado por radiación con energía igual o superior a su banda prohibida ( $E_g$ ).

Bajo estas condiciones, la ruta es: un electrón ( $e^-$ ) de la banda de valencia (BV) es promovido a la banda de conducción (BC), dejando un hueco ( $h^+$ ) en la BV (1). Estos pares electrón - hueco pueden migrar hacia la superficie del material y participar en reacciones redox con especies adsorbidas, como agua y oxígeno generando radicales altamente reactivos, principalmente radicales

hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ) (2) (3) y superóxido ( $\bullet\text{O}_2^-$ ) (4) que son responsables de la degradación de compuestos orgánicos complejos, como los tintes (Frederichi *et al.*, 2020), (Friedmann *et al.*, 2022).



**Figura 3:** Mecanismo de la fotocatalisis heterogénea para la degradación de tintes. Elaboración propia con base en (Frederichi *et al.*, 2020).



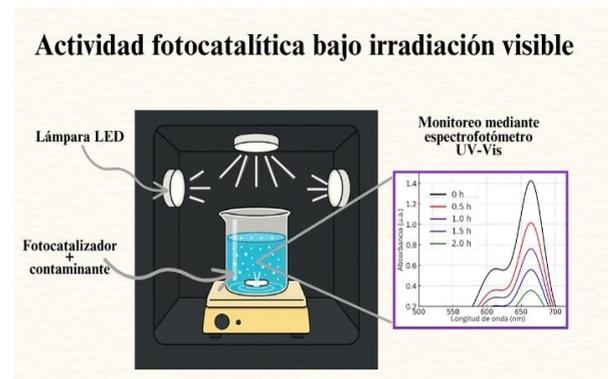
En los materiales pirocloro, este mecanismo puede optimizarse significativamente debido a sus características estructurales y electrónicas. La estructura cúbica altamente simétrica permite una red tridimensional donde los cationes A y B están coordinados con átomos de oxígeno en sitios definidos. Esta disposición favorece la formación de vacancias de oxígeno, que pueden actuar como centros de captura de electrones o huecos, prolongando su tiempo de vida útil y reduciendo la recombinación no radiativa. Como resultado, se incrementa la eficiencia fotocatalítica del material (Parayil *et al.*, 2025).

Además, la flexibilidad composicional de los pirocloros permite ajustar su banda prohibida (generalmente entre 2.5 y 3.5 eV) mediante el dopaje o sustitución isovalente o heterovalente en los sitios A o B. Simultáneamente los elementos de los sitios A y B pueden participar activamente en reacciones redox superficiales o modificar la movilidad de los portadores de carga, mejorando la transferencia interfacial (Parayil *et al.*, 2025), (Fujita *et al.*, 2022).

La morfología del material también desempeña un papel fundamental en su rendimiento fotocatalítico. Los métodos de síntesis como Pechini Sol – gel, la coprecipitación química o la combustión asistida permiten obtener pirocloros con características específicas, como, por ejemplo, el incremento en su área superficial, derivado del tamaño nanométrico de las partículas y porosidad interconectada. Estas características morfológicas favorecen tanto la adsorción eficiente de los tintes como la difusión de especies reactivas hacia los sitios activos, mejorando así la cinética del proceso. Aunado a su estabilidad estructural, estas características hacen que los pirocloros no solo sean resistentes a la irradiación prolongada, sino también altamente eficientes en la generación de especies reactivas y en la selectividad hacia la degradación de contaminantes complejos (Kim *et al.*, 2018), (Alshgari *et al.*, 2024).

En condiciones de laboratorio, la evaluación de la actividad fotocatalítica de materiales tipo pirocloro suele realizarse en sistemas de suspensión acuosa (Figura 4), donde el fotocatalizador ( $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ) se dispersa bajo agitación continua en una solución del

contaminante modelo (tinte orgánico) con una concentración determinada.



**Figura 4:** Representación esquemática del sistema de evaluación fotocatalítica bajo irradiación visible. Elaboración propia con base en (Veiga *et al.*, 2024).

La reacción es inducida mediante irradiación controlada con fuentes de luz natural o artificial, típicamente lámparas LED. Estas pruebas se desarrollan en condiciones controladas de confinamiento para asegurar uniformidad de irradiación y tener un control sobre su influencia.

La Figura 4 muestra un esquema representativo del montaje experimental empleado para la fotodegradación bajo radiación visible. El sistema consiste en una celda de reacción, colocado sobre una parrilla de agitación magnética, expuesta a luz LED desde múltiples ángulos. El monitoreo de la degradación del contaminante se realiza mediante espectroscopía de absorción UV-Vis, registrando espectros a diferentes tiempos de irradiación. La gráfica incluida es de carácter ilustrativo y permite visualizar una disminución en la banda de absorción del tinte conforme avanza la reacción. Este comportamiento está relacionado con la respuesta de los grupos funcionales complejos que componen al tinte y su degradación hacia grupos funcionales más simples. El monitoreo por espectroscopía UV-Vis permite cuantificar la eficiencia fotocatalítica en función del tiempo, además de proporcionar información referente a la cinética de la degradación.

Una etapa crítica para la eficiencia del proceso de fotocatalisis es la adsorción previa del contaminante sobre la superficie del fotocatalizador. Esta etapa determina en gran medida el contacto efectivo entre las moléculas orgánicas y los sitios activos. En los materiales tipo pirocloro, propiedades como la presencia de vacancias superficiales de oxígeno, la disponibilidad de los grupos hidroxilo coordinados, y la modulación de la carga superficial por el pH del medio, favorecen una adsorción eficiente de las moléculas que componen a los tintes. Esta interacción inicial maximiza la proximidad entre el contaminante y las especies reactivas generadas fotoquímicamente, lo que contribuye a una mayor velocidad de degradación y a una mineralización más efectiva de los compuestos orgánicos persistentes (Djurišić *et al.*, 2020).

## 6. Avances recientes en el uso de pirocloros para la degradación de tintes orgánicos

En los últimos años, diversos estudios han reportado la aplicación de materiales tipo pirocloro en la fotodegradación de tintes orgánicos, principalmente en sistemas modelo bajo condiciones controladas de laboratorio. Estos materiales han sido evaluados por su capacidad para actuar como fotocatalizadores bajo irradiación UV o visible, en procesos donde se emplean tintes

como el azul de metileno, rodamina B, naranja de acridina, naranja de metilo y carmín de índigo como contaminantes de control.

Los enfoques recientes han explorado tanto el uso de pirocloros individuales ( $A_2B_2O_7$ ) como su acoplamiento con otros compuestos ( $A_2B_2O_7/x$ ). Estas combinaciones buscan aprovechar sinérgicamente las propiedades estructurales y electrónicas de los materiales, mejorando parámetros como la absorción de luz visible, la separación de cargas y la estabilidad fotoquímica del sistema. En la Tabla 1 se presenta una síntesis de las

investigaciones más relevantes, abarcando materiales puros y compuestos híbridos. Para cada caso se describe la composición del fotocatalizador, el método de síntesis, el tinte modelo, fuente de luz empleada y la eficiencia de degradación alcanzada. Esta recopilación permite identificar tendencias recientes en el diseño de materiales pirocloro para fotocatalisis, así como los retos persistentes para su aplicación a escala práctica.

**Tabla 1:** Materiales con estructura tipo pirocloro aplicados en la fotodegradación de tintes orgánicos.

Fotocatalizador (g/L)	Método	Tinte/ [ppm]	Eg (eV)	Fuente de luz	Eficiencia/Tiempo (%-min)	Referencia
Pirocloros individuales						
$Sm_2FeTaO_7$ (1.0)	ES	CI/10	1.99	Solar	~10-600	(Torres-Martínez et al., 2012)
$Sm_2FeTaO_7$ (1.0)	SG	CI/10	2.01	Solar	~80-600	(Torres-Martínez et al., 2012)
$Sm_2Ti_2O_7$ (0.4)	SG	RB/5	2.6	LED	94-80	(Kaviyarasu et al., 2020)
* $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ (2.0)	ES	AM/20	2.51	LED	50-360	(Fukina et al., 2021)
$Bi_2GaTaO_7$ (-)	ES	RB/-	3.18	-	63-60	(Sun et al., 2022)
$Bi_2InTaO_7$ (-)	ES	RB/-	3.10	-	55-60	(Sun et al., 2022)
* $CsTeMoO_6$ (2.0)	ES	AM/20	3.1	LED	35-600	(Fukina et al., 2022)
* $CsTeMoO_6$ (2.0)	ES	NM/20	3.1	LED	25-600	(Fukina et al., 2022)
* $CsNi_{0.25}W_{1.75}O_6$ (0.6)	ES	AM/20	2.97	LED	25.8-360	(Belousov et al., 2024)
* $CsCo_{0.25}W_{1.75}O_6$ (0.6)	ES	AM/20	2.47	LED	11.9-360	(Belousov et al., 2024)
* $CsMn_{0.25}W_{1.75}O_6$ (0.6)	ES	AM/20	2.14	LED	9.8-360	(Belousov et al., 2024)
* $CsCu_{0.25}W_{1.75}O_6$ (0.6)	ES	AM/20	2.78	LED	14.5-360	(Belousov et al., 2024)
$Ce_2ZrO_7$ (0.1)	HT	AM/20	2.84	Xenón	53.38-50	(Alshgari et al., 2024)
* $KMn_{0.33}Te_{1.67}O_6$ (1.0)	ES	AM/6.4	-	Tungs	36.2-180	(Siddikha et al., 2024)
* $Y_2Zr_{1.9}Fe_{0.1}O_{6.95}$ (1.0)	SMO	AM/10	2.18	LED	97-30	(Veiga et al., 2024).
* $Y_2Ge_2O_7$ (0.001)	ES	AM/5	~4.1-4.9	Solar	31.88-90	(Parayil et al., 2025)
Pirocloros acoplados a otros compuestos						
* $Rb_{0.9}Nb_{1.625}Mo_{0.375}O_{5.62}/SnO_2$ (2.0)	HT	AM/20	3.25	LED	30.98-180	(Koryagin et al., 2023)
* $KMn_{0.33}Te_{1.67}O_6$ -g-CN (1.0)	ES	AM/6.4	2.58	Tungs	99.2-180	(Siddikha et al., 2024)
$Ce_2ZrO_7$ dopado Cu (0.1)	HT	AM/20	2.38	Xenón	96.9-50	(Alshgari et al., 2024)
$Y_2Ge_2O_7:Eu^{3+}$ (0.001)	ES	AM/5	3.5	Solar	65.21-90	(Parayil et al., 2025)
$Y_2ZrGeO_7:Eu^{3+}$ (0.001)	ES	AM/5	3.15	Solar	78.26-90	(Parayil et al., 2025)

Método: CP (coprecipitación), ES (estado sólido), HT (hidrotermal), MO (microondas), SG (Sol-gel), SMO (solvothermal asistida por microondas)  
Tinte: AM (azul de metileno), RB (rodamina B), NA (naranja de acridina), NM (naranja de metilo), CI (carmín de índigo)  
Fuente de luz: Tungs (Tungsteno)  
\*Nota: Aunque algunos autores no reportan la fórmula ideal  $A_2B_2O_7$  la información cristalográfica corresponde a una estructura tipo pirocloro.

La información presentada en la Tabla 1 evidencia la diversidad de enfoques que se han adoptado en el diseño y evaluación de materiales tipo pirocloro para la fotodegradación de tintes orgánicos. Se observa que, en varios casos, el acoplamiento de pirocloros con otros compuestos, ha permitido mejorar significativamente la eficiencia fotocatalítica, al favorecer la separación de cargas fotoinducidas o ampliar la absorción espectral hacia el visible.

Por otro lado, una estrategia adicional para incrementar la actividad fotocatalítica consiste en la incorporación de elementos como el hierro (Fe) en la red cristalina del pirocloro, lo cual permite activar mecanismos tipo Fenton y foto - Fenton en presencia de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). Este proceso genera radicales hidroxilos altamente reactivos, lo que contribuye a acelerar la degradación del contaminante, siendo particularmente útil cuando se busca una mineralización eficiente.

Asimismo, los valores de banda prohibida ( $E_g$ ) reportados en los distintos sistemas muestran cómo las características

electrónicas pueden ser moduladas a través de la selección adecuada de los cationes A y B, del dopaje o sustitución parcial y los defectos estructurales generados durante la síntesis. Éstas y otras modificaciones permiten ajustar la absorción espectral del material para hacerlo activo bajo radiación visible, lo cual representará una ventaja en términos de sostenibilidad energética.

Si bien los resultados obtenidos en sistemas modelo han sido alentadores, es necesario continuar desarrollando composiciones que mantengan una alta eficiencia bajo condiciones más cercanas a escenarios reales de tratamiento, considerando aspectos como la reutilización del fotocatalizador, su estabilidad en medios acuosos y la tolerancia a la presencia de múltiples contaminantes.

En particular, la capacidad de reutilización sin pérdida significativa de actividad representa un aspecto clave para la implementación práctica de los pirocloros en procesos fotocatalíticos. Diversos estudios han reportado la estabilidad estructural y la eficiencia sostenida de estos materiales a lo largo de algunos ciclos de fotodegradación. Por ejemplo, Belousov et

al., observaron que distintos pirocloros mantenían su capacidad para degradar azul de metileno tras sucesivos ciclos de irradiación visible (Belousov *et al.*, 2024). De forma similar, Alshgari *et al.*, reportaron que el pirocloro  $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  dopado con cobre conservó su eficiencia fotocatalítica durante cinco ciclos consecutivos, y que su estructura cristalina permaneció mayormente intacta, aunque con ligeras distorsiones reticulares atribuibles a condiciones de operación repetida (Alshgari *et al.*, 2024). Veiga *et al.*, también destacaron una alta reproducibilidad en la eficiencia del pirocloro  $\text{Y}_2\text{Zr}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_{6.95}$ , con degradaciones superiores al 97% tras tres ciclos consecutivos. El protocolo consistió únicamente en lavados con agua destilada y secado a 100 °C durante 4 horas entre ciclos, lo que evidencia una buena estabilidad estructural frente a reutilización cíclica (Veiga *et al.*, 2024).

Asimismo, Siddikha *et al.*, confirmaron la reutilización del compuesto  $\text{KMn}_{0.33}\text{Te}_{1.67}\text{O}_6\text{-g-CN}$ , empleando protocolos de regeneración que incluyeron lavados ultrasónicos y tratamientos térmicos, con pérdidas mínimas de rendimiento después de cinco ciclos de degradación (Siddikha *et al.*, 2024). Por otro lado, Djurišić *et al.*, subrayan la importancia de evaluar experimentalmente tanto la reproducibilidad como la estabilidad del fotocatalizador mediante ciclos repetidos y caracterización post – reacción, para verificar su viabilidad en condiciones reales (Djurišić *et al.*, 2020).

En conjunto, estas investigaciones indican que muchos pirocloros presentan buena estabilidad estructural y retención de eficiencia fotocatalítica, aunque en algunos casos pueden presentarse efectos acumulativos como pérdida de cristalinidad, distorsiones de red o disminución de la superficie activa, lo que justifica la necesidad de estrategias de regeneración y mejora de la durabilidad a largo plazo.

Adicionalmente, un aspecto crítico para la implementación práctica de los sistemas fotocatalíticos es la recuperación del material al finalizar el proceso de tratamiento. Si bien algunos materiales tipo pirocloro presentan propiedades magnéticas, su separación mediante campos magnéticos externos depende directamente de factores como la composición química, el grado de magnetización y el tamaño de partícula, por lo que no todos son candidatos idóneos para este tipo de recuperación. Como alternativa, diversos estudios han explorado configuraciones en las que el fotocatalizador se inmoviliza dentro de columnas de flujo o se deposita sobre soportes sólidos, tales como membranas poliméricas, sustratos metálicos, vidrios, fibras vegetales, u otros materiales estructurales (Goutham *et al.*, 2019), (Zakria *et al.*, 2021), (Zhang *et al.*, 2024). Estas estrategias permiten evitar la dispersión del fotocatalizador en el medio acuoso, facilitando su manipulación, recuperación y reutilización. Sin embargo, su implementación también conlleva ciertos desafíos, como la posible reducción del área superficial activa, limitaciones difusionales y complejidad en el diseño de los reactores. Estos aspectos abren una línea de investigación orientada al desarrollo de sistemas híbridos que logren un equilibrio entre la eficiencia fotocatalítica y viabilidad operativa.

## 7. Perspectivas

El desarrollo de pirocloros como fotocatalizadores representa un campo de estudio muy amplio, impulsado por su versatilidad composicional, estabilidad estructural y propiedades electrónicas ajustables. No obstante, su aplicación práctica requiere superar diversos retos científicos y tecnológicos. Entre ellos, se encuentra la necesidad de comprender con mayor profundidad los mecanismos de reacción involucrados, en particular el papel que

desempeñan los defectos estructurales, las vacancias de oxígeno y las interfaces en sistemas híbridos.

Adicionalmente, resulta fundamental avanzar hacia la integración de estos materiales en dispositivos funcionales o reactores fotocatalíticos de operación continua, en los cuales se evalúe no solo su eficiencia en la degradación de contaminantes, sino también parámetros críticos como la reutilización del catalizador, su estabilidad operativa a largo plazo, y la generación de subproductos no tóxicos. A mediano plazo, se proyecta su aplicación en procesos multifuncionales, tales como sistemas de fotocatalisis combinada, que integren simultáneamente la degradación de diversos contaminantes orgánicos, la remoción de metales pesados y la actividad antimicrobiana, en el contexto de remediación de aguas.

La incorporación de herramientas como la teoría del funcional de la densidad (DFT) y el modelado computacional permitirá un diseño más racional y dirigido de estos materiales, optimizando su desempeño en función del tipo de contaminante y de la fuente de luz empleada.

Además, el estudio de pirocloros en fotocatalisis heterogénea no solo constituye una estrategia viable para el tratamiento de aguas contaminadas, sino que también abre nuevas oportunidades en el desarrollo de materiales funcionales con aplicaciones en tecnologías medioambientales sostenibles.

## 8. Conclusiones

Los óxidos tipo pirocloro destacan como materiales fotocatalíticos relevantes para la degradación de tintes orgánicos, debido a su estructura altamente simétrica, estabilidad química y capacidad para ajustar propiedades electrónicas mediante la incorporación de diferentes cationes y defectos estructurales. La elección del método de síntesis influye directamente en su morfología y rendimiento, mientras que estrategias como el dopaje/sustitución o el acoplamiento con otros compuestos han demostrado mejorar su actividad fotocatalítica. No obstante, su implementación práctica aún enfrenta desafíos relacionados con la estabilidad a largo plazo, la reutilización y la eficiencia en condiciones reales, lo que justifica continuar con estudios enfocados en su optimización y escalabilidad.

## Agradecimientos

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IN114324.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## Referencias

- Alshgari, R. A., Abdullah, M., Abbas Shah, S. I., Abid, A. G., Mohammad, S., Ehsan, M. F., Ashiq, M. N., & Allakhverdiev, S. I. (2024). Enhanced photocatalytic property of Cu doped  $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  toward photodegradation of methylene blue under visible light. *Heliyon*, 10(14), e34266. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34266
- Belousov, A. S., Parkhacheva, A. A., Suleimanov, E. V., Fukina, D. G., Markov, A. N., Vorotyntsev, A. V., Koroleva, A. V., Zhizhin, E. V., & Shafiq, I. (2024). Design of visible light-responsive  $\text{CsM}_{0.25}\text{W}_{1.75}\text{O}_6$  (M = Ni, Co, Mn, Cu)  $\beta$ -pyrochlore oxides with enhanced photocatalytic activity towards a set of pollutants. *Ceramics International* 50(22), 45334–45352. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.08.374

- De los Santos, D. M., Navas, J., Aguilar, T., Sánchez-Coronilla, A., Fernández-Lorenzo, C., Alcántara, R., Piñero, J. C., Blanco, G., & Martín-Calleja, J. (2015). Tm-doped TiO<sub>2</sub> and Tm<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> pyrochlore nanoparticles: enhancing the photocatalytic activity of rutile with a pyrochlore phase. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 605–616. DOI: 10.3762/bjnano.6.62
- Djurišić, A. B., He, Y., & Ng, A. M. C. (2020). Visible-light photocatalysts: Prospects and challenges. *APL Materials*, 8(3), 30903. DOI: 10.1063/1.5140497
- Frederichi, D., Scaliante, M. H. N. O., & Bergamasco, R. (2020). Structured photocatalytic systems: photocatalytic coatings on low-cost structures for treatment of water contaminated with micropollutants—a short review. *Environmental Science and Pollution Research* 2020 28:19, 28(19), 23610–23633. DOI: 10.1007/s11356-020-10022-9
- Friedmann, D. (2022). A General Overview of Heterogeneous Photocatalysis as a Remediation Technology for Wastewaters Containing Pharmaceutical Compounds. *Water*, 14(21), 3588. DOI: 10.3390/w14213588
- Fujita, T. C., Ito, H., & Kawasaki, M. (2022). Trends in bandgap of epitaxial A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (A = Sn, Pb; B = Nb, Ta) films fabricated by pulsed laser deposition. *APL Materials*, 10(5). DOI: 10.1063/5.0089731
- Fukina, D. G., Koryagin, A. V., Koroleva, A. V., Zhizhin, E. V., Suleimanov, E. V., & Kirillova, N. I. (2021). Photocatalytic properties of β-pyrochlore RbTe<sub>1.5</sub>W<sub>0.5</sub>O<sub>6</sub> under visible-light irradiation. *Journal of Solid State Chemistry*, 300, 122235. DOI: 10.1016/j.jssc.2021.122235
- Fukina, D. G., Koryagin, A. V., Koroleva, A. V., Zhizhin, E. V., Suleimanov, E. V., Volkova, N. S., & Kirillova, N. I. (2022). The role of surface and electronic structure features of the CsTeMoO<sub>6</sub> β-pyrochlore compound during the photooxidation dyes process. *Journal of Solid State Chemistry*, 308, 122939. DOI: 10.1016/j.jssc.2022.122939
- Goutham, R., Badri Nayan, R., Srikanth, B., & Gopinath, K. P. (2019). Supporting Materials for Immobilisation of Nano-photocatalysts. In: Inamuddin, Sharma, G., Kumar, A., Lichtfouse, E., & Asiri, A. (Eds.), *Environmental Chemistry for a Sustainable World: Nanophotocatalysis and Environmental Applications*. Vol. 29. Springer, Cham. Ch. 2, pp. 49–82. DOI: 10.1007/978-3-030-10609-6\_2
- Jayaraman, V., & Mani, A. (2020). Interfacial coupling effect of high surface area Pyrochlore like Ce<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> over 2D g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sheet photoactive material for efficient removal of organic pollutants. *Separation and Purification Technology*, 235, 116242. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116242
- Kaviyarasu, K., Magdalane, C. M., Jayakumar, D., Samson, Y., Bashir, A. K. H., Maaza, M., Letsholathebe, D., Mahmoud, A. H., & Kennedy, J. (2020). High performance of pyrochlore like Sm<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> heterojunction photocatalyst for efficient degradation of rhodamine-B dye with waste water under visible light irradiation. *Journal of King Saud University - Science*, 32(2), 1516–1522. DOI: 10.1016/j.jksus.2019.12.006
- Kim, J., Shih, P. C., Qin, Y., Al-Bardan, Z., Sun, C. J., & Yang, H. (2018). A Porous Pyrochlore Y<sub>2</sub>[Ru<sub>1.6</sub>Y<sub>0.4</sub>]O<sub>7-δ</sub> Electrocatalyst for Enhanced Performance towards the Oxygen Evolution Reaction in Acidic Media. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(42), 13877–13881. DOI: 10.1002/anie.201808825
- Kimura, T. (2011). Molten Salt Synthesis of Ceramic Powders. *Advances in Ceramics - Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications*. DOI: 10.5772/20472
- Koryagin, A. V., Fukina, D. G., Shotina, V. A., Titaev, D. N., Shilova, E. V., & Suleimanov, E. V. (2023). The electronic structure modification and photocatalytic ability improvement of Rb<sub>0.9</sub>Nb<sub>1.625</sub>Mo<sub>0.375</sub>O<sub>5.62</sub> β-pyrochlore compound. *Materials Science and Engineering: B*, 297, 116732. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.116732
- Luan, J., Zou, Z., Minghui, L., Luan, G., & Chen, Y. (2006). Structural and photocatalytic properties of the new solid photocatalyst In<sub>2</sub>BiTaO<sub>7</sub>. *Research on Chemical Intermediates*, 32(1), 31–42. DOI: 10.1163/156856706775012950
- Momma, K., & Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*, 44(6), 1272–1276. DOI: 10.1107/S0021889811038970
- Parayil, R. T., Singh, P., Sudarshan, K., Mohapatra, M., Devi, P., & Gupta, S. K. (2025). Band gap and structural engineering to achieve excellent photocatalysis in A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub> type composition. *Inorganic Chemistry Communications*, 174, 113965. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.113965
- Siddikha, A., Sathyanarayana, B., Muga, V., & Abdul Mujeeb, M. (2024). Preparation, characterization and photocatalytic studies of defect pyrochlore, KMn<sub>0.33</sub>Te<sub>1.67</sub>O<sub>6</sub> and its composite with g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Chemistry of Inorganic Materials*, 3, 100053. DOI: 10.1016/j.cinorg.2024.100053
- Subramnian, M. A., Aravamudan, G., & Subba Rao, G. V. (1983) Oxide pyrochlores — A review. *Progress in Solid State Chemistry*, 15(2), 55–143. DOI: 10.1016/0079-6786(83)90001-8
- Sun, X., Gu, M., Yang, J., Ye, G., Xiao, X., Chen, M., Liu, M., Chen, Z., & Huang, H. (2022). The photocatalytic performances of Bi<sub>2</sub>MTaO<sub>7</sub> (M = Ga, In) photocatalysts for environmental cleaning under visible-light. *Inorganic Chemistry Communications*, 139, 109390. DOI: 10.1016/j.inoche.2022.109390
- Tokura, Y., Motome, Y., & Ueda, K. (2025). Metal-insulator transitions in pyrochlore oxides. *Reports on Progress in Physics*, 88(5), 056001. DOI: 10.1088/1361-6633/add0c5
- Torres-Martínez, L. M., Ruiz-Gómez, M. A., Figueroa-Torres, M. Z., Juárez-Ramírez, I., & Moctezuma, E. (2012). Sm<sub>2</sub>FeTaO<sub>7</sub> Photocatalyst for Degradation of Indigo Carmine Dye under Solar Light Irradiation. *International Journal of Photoenergy*, 2012(1), 939608. DOI: 10.1155/2012/939608
- Veiga, E. L. dos S., Murr, C. G. Ferreira de Souza, E. C., Alves, S. A., A. S., Antunes, S. R. M., Beltrán-Mir, H., & Cordoncillo, E., (2024). Fe-doped pyrochlores and defect fluorites as photocatalysts: Efficient dye degradation under visible light irradiation. *Journal of Rare Earths*. DOI: 10.1016/j.jre.2024.08.007
- Wang, Y., Jing, C., Ding, Z. Y., Zhang, Y. Z., Wei, T., Ouyang, J. H., Liu, Z. G., Wang, Y. J., & Wang, Y. M. (2023). The Structure, Property, and Ion Irradiation Effects of Pyrochlores: A Comprehensive Review. *Crystals* 13(1), 143. DOI: 10.3390/cryst13010143
- Zhang, C., Wang, F., Xiong, B., & Yang, H. (2022). Regulating the electronic structures of mixed B-site pyrochlore to enhance the turnover frequency in water oxidation. *Nano Convergence*, 9(1), 1–11. DOI: 10.1186/s40580-022-00311-z
- Zhang, J., Wu, H., Shi, L., Wu, Z., Zhang, S., Wang, S., & Sun, H. (2024). Photocatalysis coupling with membrane technology for sustainable and continuous purification of wastewater. *Separation and Purification Technology*, 329, 125225. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.125225
- Zhu, M., Liang, X., Yang, B. B., Zhu, S. J., Xie, C., Hu, L., Wei, R. H., Lu, W. J., Zhu, X. B., & Sun, Y. P. (2021). Sizeable bandgap modulation in Y<sub>2</sub>Hf<sub>2</sub>O<sub>7</sub> pyrochlore oxide thin films through B-site substitution. *Applied Physics Letters*, 118(14). DOI: 10.1063/5.0047701
- Zakria, H. S., Othman, M. H. D., Kamaludin, R., Sheikh Abdul Kadir, S. H., Kurniawan, T. A., & Jilani, A. (2021). Immobilization techniques of a photocatalyst into and onto a polymer membrane for photocatalytic activity. *RSC Advances*, 11(12), 6985–7014. DOI: 10.1039/D0RA10964