



## Fotocatálisis y sostenibilidad: Soluciones científicas para la remediación ambiental y la energía limpia

### Photocatalysis and sustainability: Scientific solutions for environmental remediation and clean energy

---

Sandra Cipagauta-Díaz <sup>1,\*</sup>, Luis May-Ix <sup>1</sup>, Fernando Tobola <sup>2</sup>, Víctor Suárez <sup>2,3,\*</sup>, Monserrat Suárez <sup>2,4,\*</sup>

<sup>1</sup> SECIHTI-Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Química

<sup>2</sup> Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana

<sup>3</sup> Departamento Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana

<sup>4</sup> Departamento de Química, Instituto Politécnico Nacional

\* Autor de correspondencia: victorm\_suarez@hotmail.com, msuarezq@ipn.mx; Tel: 555624200.

**Fecha de Recepción:** 13 de enero del 2026.

**Fecha de Revisión:** 31 de enero del 2026.

**Fecha de Publicación:** 8 de mayo del 2026.

ISSN: 3061-838X

DOI: 10.82580/revateh.v2i2.36

**Citación:** Sandra Cipagauta-Díaz, Luis May-Ix, Fernando Tobola, Víctor Suárez, Monserrat Suárez. Fotocatálisis y Sostenibilidad: Soluciones Científicas para la Remediación Ambiental y la Energía Limpia. Revista en Ciencia y Tecnología del Valle de Tehuacán, 2026, 2, 1-11.

**Copyright:** © 2026 por los autores. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

### Resumen

La fotocatálisis heterogénea se ha consolidado como una estrategia prometedora para enfrentar de manera simultánea problemáticas ambientales y energéticas asociadas a la contaminación y al uso intensivo de combustibles fósiles. En esta revisión bibliográfica se analiza de forma integral el papel de los materiales semiconductores en diversas aplicaciones fotocatalíticas, incluyendo la degradación de colorantes orgánicos, la oxidación de arsénico en fase acuosa, la producción fotocatalítica de hidrógeno y la reducción de dióxido de carbono. Los estudios revisados evidencian que la eficiencia de los procesos fotocatalíticos depende del diseño estructural y electrónico de los materiales, más allá del semiconductor base utilizado. En la degradación de colorantes, la modificación del TiO<sub>2</sub> mediante soportes inertes y heterouniones activas bajo luz visible permite mejorar la separación de cargas y la estabilidad del proceso. En el caso del arsénico, se observa una evolución desde sistemas enfocados únicamente en la oxidación de As(III) hacia materiales derivados de hidrotalcitas capaces de integrar la adsorción y posterior remoción del contaminante. Para aplicaciones energéticas, los trabajos analizados demuestran que es posible alcanzar altas tasas de producción de hidrógeno y una mayor selectividad en la reducción de CO<sub>2</sub> mediante el uso de heterouniones semiconductoras, co-catalizadores y óxidos metálicos mixtos derivados de hidróxidos dobles laminares. En conjunto, esta revisión destaca que el desarrollo de materiales multifuncionales y estrategias integradas es clave para avanzar hacia aplicaciones fotocatalíticas sostenibles y tecnológicamente viables.

**Palabras clave:** Hidrotalcitas, Fotocatálisis, Producción de hidrógeno, Remoción de arsénico, Reducción de CO<sub>2</sub>.



## Abstract

Heterogeneous photocatalysis has emerged as a promising strategy to simultaneously address environmental pollution and energy challenges associated with the intensive use of fossil fuels. This bibliographic review provides an integrated analysis of the role of semiconductor materials in several photocatalytic applications, including the degradation of organic dyes, arsenic oxidation in aqueous media, photocatalytic hydrogen production, and carbon dioxide reduction. The reviewed studies demonstrate that photocatalytic efficiency strongly depends on the structural and electronic design of the materials, rather than solely on the base semiconductor. In dye degradation processes, the modification of TiO<sub>2</sub> through inert supports and visible-light-active heterojunctions enhance charge separation and improve catalyst stability. In the case of arsenic remediation, a clear evolution is observed from systems focused exclusively on As(III) oxidation toward materials derived from hydrotalcites capable of integrating the adsorption and subsequent removal of the contaminant.

Regarding energy-related applications, the analyzed works show that high hydrogen production rates and improved CO<sub>2</sub> reduction selectivity can be achieved through rational heterojunction design, the use of co-catalysts, and mixed metal oxides derived from layered double hydroxides. Overall, this review highlights that the development of multifunctional materials and integrated design strategies is essential for advancing photocatalytic technologies toward sustainable and practical applications.

**Keywords:** Hydrotalcites, Photocatalysis, Hydrogen production, Arsenic removal, Reduction of CO<sub>2</sub>

## 1. Introducción

La contaminación ambiental y la crisis energética global representan dos de los principales desafíos científicos y tecnológicos del siglo XXI. El uso intensivo de combustibles fósiles ha provocado un incremento sostenido en las emisiones de gases de efecto invernadero, así como la liberación de contaminantes orgánicos e inorgánicos persistentes en cuerpos de agua y en la atmósfera. Ante este panorama, el desarrollo de tecnologías sostenibles basadas en el aprovechamiento de la energía solar ha adquirido un papel central dentro de la investigación en catálisis y ciencia de materiales [1,2].

La fotocatalisis heterogénea se ha consolidado como una estrategia prometedora para abordar simultáneamente problemas de remediación ambiental y producción de energía limpia. Este proceso se fundamenta en la activación de materiales semiconductores mediante irradiación de luz, generando pares electrón-hueco capaces de inducir reacciones de oxidación y reducción en la superficie del catalizador. Gracias a su versatilidad, la fotocatalisis ha

sido aplicada en la degradación de contaminantes orgánicos, la eliminación de especies tóxicas inorgánicas, la producción de hidrógeno y la reducción de dióxido de carbono [1-4].

Entre las aplicaciones ambientales más estudiadas destaca la degradación fotocatalítica de colorantes orgánicos, ampliamente empleados en las industrias textil, farmacéutica y alimentaria. Colorantes como la Rodamina B presentan elevada estabilidad química, toxicidad y resistencia a tratamientos convencionales, favoreciendo su persistencia en el ambiente. Diversos estudios han demostrado que el uso de fotocatalizadores modificados permite una degradación eficiente de estos compuestos, incluso bajo irradiación visible, atribuida a una mejor absorción de luz solar y a una reducción en la recombinación de cargas fotogeneradas [3-6].

Por otro lado, la contaminación por arsénico en aguas naturales constituye un problema grave de salud pública. En medios acuosos, el arsénico se encuentra principalmente en los estados de oxidación As(III) y As(V), siendo la especie trivalente la más tóxica y



móvil. La oxidación fotocatalítica de As(III) a As(V) resulta de gran relevancia, ya que facilita su posterior remoción mediante procesos convencionales de tratamiento de agua. En este contexto, se ha reportado que el uso de sistemas semiconductores acoplados mejora significativamente la eficiencia de oxidación, como resultado de una separación más eficiente de los pares electrón-hueco y una adecuada alineación de las bandas electrónicas [7-9].

Desde el punto de vista energético, la producción fotocatalítica de hidrógeno mediante la división del agua y la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> han emergido como rutas sostenibles para la generación de combustibles limpios y la mitigación del cambio climático. El hidrógeno es considerado un vector energético ideal debido a que su combustión no produce emisiones contaminantes, mientras que la conversión del CO<sub>2</sub> en productos de valor agregado contribuye al cierre del ciclo del carbono. Sin embargo, la eficiencia de estos procesos depende en gran medida de las propiedades estructurales, ópticas y electrónicas de los fotocatalizadores empleados [1,10-13].

En este sentido, los materiales semiconductores han sido el eje central del desarrollo fotocatalítico. El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) se ha estudiado ampliamente debido a su alta estabilidad química, bajo costo y baja toxicidad. No obstante, su activación limitada a la región ultravioleta del espectro solar y la rápida recombinación de cargas fotogeneradas representan desventajas importantes. Para superar estas limitaciones, se han propuesto diversas estrategias, tales como el dopaje con metales o no metales, la formación de heterouniones y la incorporación de co-catalizadores [3,4,6].

Así mismo, los materiales tipo hidrotalcita, también conocidos como Hidróxidos Dobles Laminares (HDL), han despertado un interés creciente en el campo de la fotocatalisis. Estos materiales se caracterizan por su estructura laminar, alta área superficial y composición química ajustable. Tras su calcinación, las hidrotalcitas dan lugar a

mezcla de óxidos metálicos (MMO) altamente dispersos, con propiedades electrónicas favorables para aplicaciones fotocatalíticas. Diversos estudios han reportado que los MMO derivados de HDL presentan un desempeño sobresaliente en la degradación de contaminantes orgánicos, la oxidación de especies tóxicas, la producción fotocatalítica de hidrógeno y la reducción de CO<sub>2</sub>, debido a una mejor separación de cargas y a la posibilidad de activación bajo luz visible [9,11].

En este contexto, el presente trabajo corresponde a una revisión bibliográfica que compila y analiza de manera crítica diferentes estudios previamente publicados relacionados con la degradación fotocatalítica de colorantes, la oxidación de arsénico, la producción de hidrógeno y la reducción de CO<sub>2</sub>. Este compendio tiene como objetivo ofrecer una visión integral sobre el papel de los materiales semiconductores, con énfasis en sistemas basados en TiO<sub>2</sub> y en MMO derivados de HDL, destacando sus avances, limitaciones y perspectivas en aplicaciones ambientales y energéticas.

## 2. Metodología

La presente revisión bibliográfica se desarrolló mediante un análisis sistemático y crítico de literatura científica relacionada con aplicaciones fotocatalíticas en la degradación de colorantes orgánicos, la oxidación de arsénico en fase acuosa, la producción fotocatalítica de hidrógeno y la reducción de CO<sub>2</sub>. Para ello, se seleccionaron artículos de investigación publicados en revistas internacionales indexadas, priorizando trabajos que abordaran el diseño, síntesis, caracterización y evaluación fotocatalítica de materiales semiconductores y materiales derivados de HDL.

La recopilación de información se centró en estudios donde los fotocatalizadores fueron sintetizados mediante métodos reproducibles y ampliamente reportados, tales como sol-gel, coprecipitación, síntesis hidrotermal y métodos asistidos por microondas, incluyendo modificaciones estructurales mediante dopaje, formación de



heterouniones y calcinación controlada de precursores laminares para la obtención de MMO [1–4]. Se incluyeron trabajos basados en  $\text{TiO}_2$  y materiales compuestos como  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ ,  $\text{BiVO}_4/\text{N-TiO}_2$ , así como sistemas avanzados basados en HDL y MMO de Zn, Al, Fe e In, dada su relevancia en procesos fotocatalíticos activados por radiación UV y visible [6–11].

Los criterios de selección consideraron artículos que incluyeran una caracterización fisicoquímica completa de los materiales, empleando técnicas como Difracción de Rayos X (DRX), adsorción-desorción de  $\text{N}_2$  (BET), microscopía electrónica (SEM y TEM), espectroscopía infrarroja (FTIR), reflectancia difusa UV-Vis (DRS), fotoluminiscencia y, cuando fue pertinente, análisis fotoelectroquímicos. Esta información permitió correlacionar las propiedades estructurales, texturales y electrónicas de los materiales con su desempeño fotocatalítico [4-6,9,11].

En cuanto a la evaluación fotocatalítica, se analizaron estudios realizados bajo condiciones controladas de irradiación UV y visible, considerando variables como tipo de fuente de luz, longitud de onda, intensidad, uso de agentes sacrificantes (por ejemplo, metanol en producción de hidrógeno), pH del medio y concentración inicial del contaminante. Para el caso de la oxidación de As(III), se incluyeron trabajos que combinaron procesos de fotooxidación y adsorción, particularmente aquellos basados en MMO derivados de HDL, donde la retención simultánea de As(V) en la superficie del material es un aspecto clave del proceso [7-9].

Finalmente, la información recopilada fue organizada por bloques temáticos de aplicación, permitiendo comparar enfoques metodológicos, mecanismos propuestos y tendencias en el diseño de materiales fotocatalíticos. Esta metodología asegura una visión integral del estado del arte y sustenta el carácter del presente trabajo como un compendio crítico de investigaciones previamente publicadas, orientado a divulgar y analizar estrategias

consolidadas y emergentes en fotocatalisis heterogénea.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Degradación fotocatalítica de colorantes

La degradación fotocatalítica de colorantes orgánicos persistentes, como Congo Red y Rodamina B, ha sido ampliamente estudiada debido a su elevada estabilidad química y resistencia a tratamientos convencionales [3,4]. En este contexto, Estrella-González *et al.*, [5] evaluaron materiales  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  y  $\text{P/TiO}_2\text{-SiO}_2$  sintetizados por el método sol-gel para la degradación de Congo Red bajo irradiación UV. Los autores reportaron eficiencias de degradación superiores al 90%, acompañadas de una mineralización significativa del colorante. La incorporación de  $\text{SiO}_2$  permitió incrementar el área superficial y mejorar la dispersión de la fase activa, mientras que la modificación con fósforo favoreció la estabilidad estructural del material durante ciclos consecutivos de reacción.

Posteriormente, Cipagauta-Díaz *et al.*, [6] estudiaron heteroestructuras  $\text{BiVO}_4/\text{N-TiO}_2$  para la degradación fotocatalítica de Rodamina B bajo irradiación visible. Estos sistemas alcanzaron conversiones cercanas al 98%, superando claramente el desempeño del  $\text{TiO}_2$  sin modificar. La reducción del ancho de banda prohibida y la ampliación de la absorción hacia la región visible permitieron una mayor fotoactividad bajo condiciones más cercanas a la radiación solar.

De manera general, los estudios sobre degradación de Rodamina B con sistemas  $\text{TiO}_2$  modificados muestran una cinética de reacción acelerada, asociada a la generación eficiente de especies reactivas de oxígeno (ROS), particularmente, el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) y superóxido ( $\text{O}_2\bullet^-$ ), responsables de la ruptura progresiva de los enlaces cromóforos del colorante y su posterior mineralización [3,4].

El análisis conjunto de estos trabajos muestra que la eficiencia en la degradación fotocatalítica de colorantes no depende

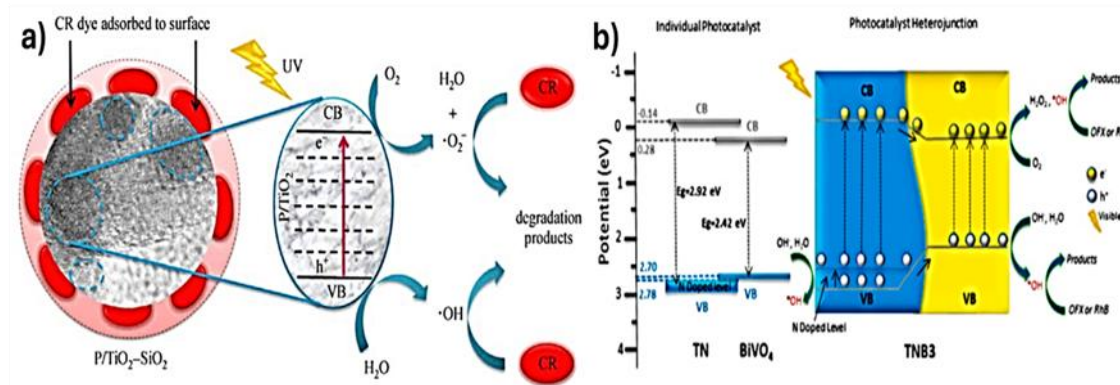


únicamente del valor del band gap del semiconductor, sino de la sinergia entre propiedades texturales, electrónicas y superficiales [3,4]. En los sistemas  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  y  $\text{P/TiO}_2\text{-SiO}_2$ , la sílice actúa como una matriz estructural inerte, limitando la sinterización del  $\text{TiO}_2$  durante la calcinación y preservando una elevada accesibilidad a los sitios activos, lo que explica la buena estabilidad observada en los ensayos de reutilización [5].

Por otro lado, las heterouniones  $\text{BiVO}_4/\text{N-TiO}_2$  representan un enfoque idóneo, en el cual la alineación favorable de bandas permite una separación más eficiente de los pares electrón-hueco, reduciendo la recombinación y promoviendo la

generación sostenida de ROS [6]. Este comportamiento se traduce en una degradación más rápida y eficiente de Rodamina B bajo luz visible, aspecto importante para el tratamiento fotocatalítico de aguas residuales utilizando radiación solar.

Los trabajos revisados confirman que el diseño de materiales híbridos y heteroestructurados es una estrategia adecuada para mejorar la eficiencia y estabilidad de los procesos fotocatalíticos aplicados a la eliminación de colorantes, superando las limitaciones del  $\text{TiO}_2$  convencional y acercando estas tecnologías a aplicaciones ambientales reales [3,4].



**Figura 1.** Comparación esquemática de los mecanismos de degradación fotocatalítica de colorantes sobre a)  $\text{P/TiO}_2\text{-SiO}_2$  [5] y b) heterouniones  $\text{BiVO}_4/\text{N-TiO}_2$ , mostrando generación de ROS y rutas de mineralización [6].

### 3.2 Oxidación fotocatalítica de arsénico

Los tres estudios analizados abordan la oxidación fotocatalítica de  $\text{As(III)}$ , empleando semiconductores basados en  $\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  y MMO derivados de HDL. May-Ix *et al.*, (2014) [7] evaluaron semiconductores  $\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  sintetizados por sol-gel, reportando una oxidación casi completa de  $\text{As(III)}$  a  $\text{As(V)}$  bajo irradiación UV-Vis. La incorporación de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en  $\text{TiO}_2$  permitió mejorar significativamente la actividad fotocatalítica con respecto al material de referencia ( $\text{TiO}_2$  puro), incluso a concentraciones elevadas de arsénico, manteniendo una buena estabilidad estructural del material.

Por su parte, Navarrete-Magaña *et al.*, (2021) [8] estudiaron heteroestructuras  $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ ,

observando altas conversiones de  $\text{As(III)}$  en tiempos cortos de irradiación y un desempeño superior al  $\text{TiO}_2$  puro. Estos materiales mostraron una respuesta fotoactiva consistente en un rango amplio de pH, aspecto relevante para aplicaciones en aguas naturales, así como una mayor eficiencia cuántica asociada a la presencia de  $\text{WO}_3$  como fase secundaria.

En un enfoque más reciente, May-Ix *et al.*, (2024) [9] desarrollaron MMO de  $\text{ZnAlFe}$  derivados de  $\text{ZnAlFe-HDL}$ , los cuales mostraron un comportamiento notablemente distinto. En condiciones de oscuridad, estos materiales lograron una remoción parcial de  $\text{As(III)}$  por adsorción; sin embargo, bajo un proceso simultáneo de adsorción e irradiación UV-Vis alcanzaron



remociones superiores al 99.9%, reduciendo la concentración final de arsénico total a valores inferiores al límite establecido por la OMS ( $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ) [10]. A diferencia de los sistemas basados exclusivamente en  $\text{TiO}_2$ , los ZnAlFe-MMO no solo oxidaron As(III) a As(V), sino que adsorbieron el As(V) en su superficie, mostrando además buena estabilidad y reutilización tras varios ciclos de reacción.

El análisis conjunto de estos tres trabajos evidencia una evolución clara en las estrategias fotocatalíticas para el tratamiento de arsénico en agua. Los sistemas  $\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  y  $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$  demuestran que la modificación electrónica del  $\text{TiO}_2$  mediante la incorporación de óxidos metálicos es una estrategia eficaz para potenciar la oxidación fotocatalítica de As(III) [7,8]. En ambos casos, la mejora se asocia a una reducción de la recombinación electrón-hueco y a una mayor disponibilidad de huecos fotogenerados con suficiente poder oxidante para transformar As(III) en As(V).

Sin embargo, estos sistemas presentan una limitación común: el As(V) formado permanece mayoritariamente en solución, lo que implica la necesidad de etapas adicionales de separación o adsorción para

completar el proceso de remoción. Esta limitación es especialmente relevante desde una perspectiva aplicada, ya que la oxidación por sí sola no garantiza la eliminación total del contaminante.

En contraste, los MMO derivados de HDL representan un cambio conceptual en el tratamiento fotocatalítico del arsénico. La presencia de Fe en la matriz del ZnAlFe-MMO introduce centros redox que facilitan la separación de cargas y la generación de  $\bullet\text{OH}$ , mientras que la elevada densidad de grupos hidroxilo superficiales favorece la adsorción e inmovilización del As(V) [9]. De este modo, estos materiales integran en un solo sistema la oxidación fotocatalítica y la retención superficial, superando una de las principales limitaciones de los semiconductores tradicionales.

En conjunto, los resultados indican que, si bien los sistemas basados en  $\text{TiO}_2$  modificado son altamente eficientes para la oxidación de As(III), los materiales derivados de HDL ofrecen una aproximación más integral y prometedora para aplicaciones reales, al combinar eficiencia fotocatalítica, retención del contaminante y estabilidad estructural.

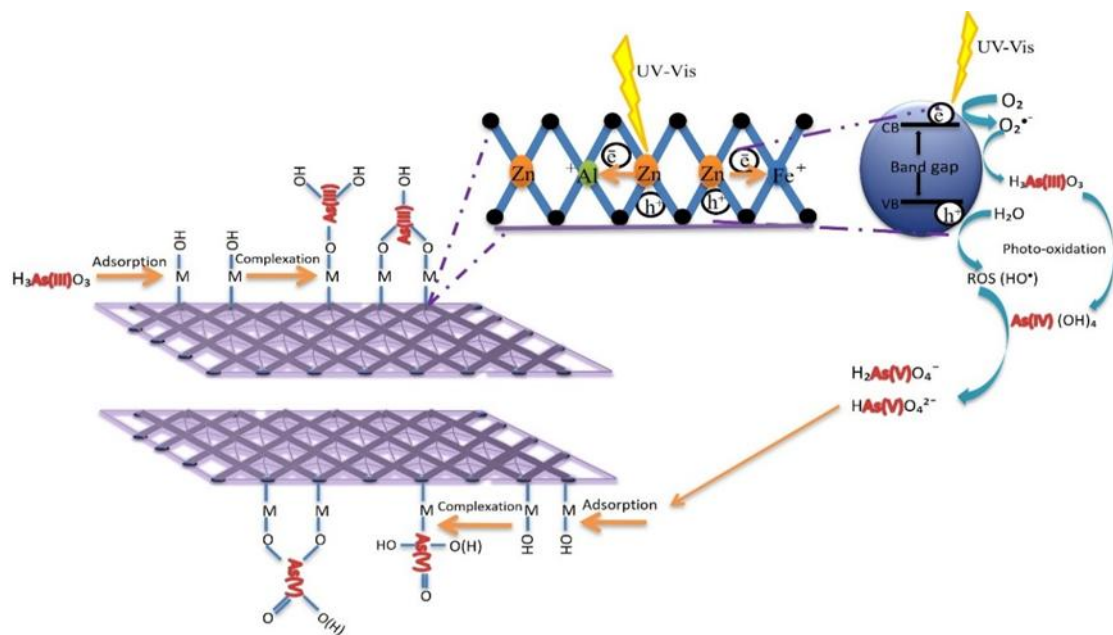


Figura 2. Representación esquemática de la remoción de As(III) por ZnAlFe-MMO derivado de ZnAlFe-HDL [9].



### 3.3 Producción fotocatalítica de hidrógeno ( $H_2$ )

Los estudios analizados abordan la producción fotocatalítica de  $H_2$  mediante el diseño de semiconductores modificados y materiales derivados de HDL, con el objetivo de mejorar la separación de cargas y reducir el uso de metales nobles. Navarrete *et al.*, [11] desarrollaron semiconductores  $Ga_2O_3/TiO_2$  libres de metales nobles mediante el método sol-gel y evaluaron su desempeño en la producción de  $H_2$  a partir de una mezcla agua-metanol bajo irradiación UV. El material con 5 % en peso de  $Ga_2O_3$  mostró la mayor actividad fotocatalítica, alcanzando tasas de producción superiores a  $1200 \mu\text{mol g}^{-1}$  en 5 h de reacción, superando incluso al material  $Pt/TiO_2$  de referencia. Este comportamiento fue atribuido a la formación de una heterounión eficiente entre  $Ga_2O_3$  y  $TiO_2$ , evidenciada por la disminución de la intensidad de fotoluminiscencia.

Por otro lado, Suárez-Quezada *et al.*, [12] estudiaron MMO de Zn-Al-In derivados de HDL para la producción de  $H_2$  bajo irradiación visible. Los materiales mostraron una elevada actividad fotocatalítica sin necesidad de co-catalizadores metálicos nobles, alcanzando tasas de producción de  $H_2$  superiores a las de óxidos simples. La composición química del HDL precursor y la relación  $In/(Al+In)$  resultaron determinantes en el desempeño del material, evidenciando el papel del control composicional en la eficiencia del proceso.

De manera complementaria, Gómez-Cholula *et al.*, [13] evaluaron materiales semiconductores modificados con agentes complejantes orgánicos, reportando un incremento en la producción de  $H_2$  bajo luz visible. Los autores atribuyeron este comportamiento a una mejora en la separación de cargas y a una mayor disponibilidad de sitios activos para la reducción de protones, reforzando la importancia de la ingeniería superficial en sistemas fotocatalíticos.

El análisis conjunto de estos trabajos evidencia que la producción fotocatalítica de

$H_2$  ha evolucionado desde el uso de semiconductores convencionales hacia el diseño de heterouniones y materiales multifuncionales, con énfasis en la reducción de costos y el aprovechamiento de la radiación visible [11-13]. En el caso del sistema  $Ga_2O_3/TiO_2$ , la mejora en la actividad fotocatalítica se explica por la formación de una heterounión tipo I, que favorece la transferencia interfacial de electrones desde  $TiO_2$  hacia  $Ga_2O_3$ , reduciendo la recombinación electrón-hueco y aumentando la disponibilidad de electrones para la reducción de protones [11].

Por su parte, los MMO de ZnAlIn derivados de ZnAlIn-HDL representan un enfoque alternativo altamente atractivo, ya que integran en un solo material una elevada área superficial, baja cristalinidad y una dispersión homogénea de cationes metálicos activos. Estas características favorecen la separación y el transporte de cargas, permitiendo una producción eficiente de  $H_2$  sin recurrir a metales nobles. Además, la posibilidad de ajustar la composición química del HDL precursor permite modular las propiedades electrónicas del material por mejora de su respuesta fotoactiva [12].

Los resultados reportados por Gómez-Cholula *et al.*, refuerzan la idea de que la modificación superficial y química del semiconductor puede desempeñar un papel tan relevante como la estructura cristalina en la eficiencia del proceso. En conjunto, estos estudios demuestran que la clave para mejorar la producción fotocatalítica de  $H_2$  radica en la sinergia entre estructura electrónica, composición química y diseño de interfaces, más que en el uso de materiales individuales altamente cristalinos [13].

Desde una perspectiva de aplicación, los sistemas libres de metales nobles, como  $Ga_2O_3/TiO_2$  y MMO derivados de HDL, se posicionan como alternativas prometedoras para el desarrollo de tecnologías de producción de  $H_2$  sostenibles y económicamente viables.

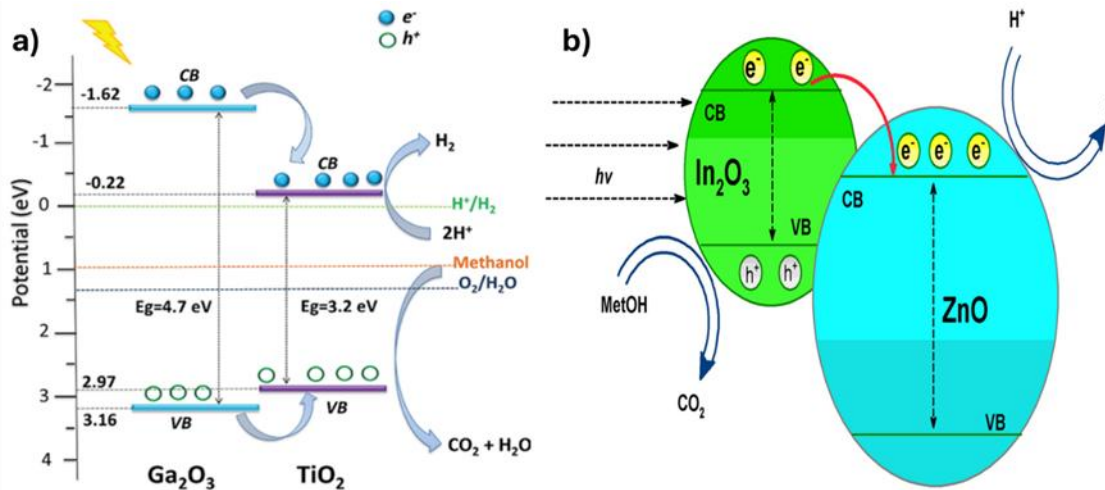


Figura 3. a) Heterounión tipo I de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> y b) Heterounión Tipo II de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO derivado de ZnAlIn-HDL, mostrando separación de cargas y rutas de reducción de protones para producción de H<sub>2</sub>.

### 3.4 Reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>

Los estudios analizados abordan la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> como una estrategia para la conversión de un gas de efecto invernadero en productos de valor agregado, principalmente CO y metanol, mediante el uso de semiconductores modificados. Quiroz-Cardoso *et al.*, [14] diseñaron materiales compuestos de Ni/GO-TiO<sub>2</sub> para mejorar la activación del CO<sub>2</sub> y la separación de cargas fotogeneradas. Bajo irradiación UV-Vis, estos sistemas mostraron una mayor conversión de CO<sub>2</sub> y selectividad hacia metanol en comparación de TiO<sub>2</sub> puro. La incorporación de óxido de grafeno (GO) favoreció la transferencia electrónica, mientras que el Ni metálico actuó como sitio activo para la adsorción y activación del CO<sub>2</sub>, facilitando la formación de intermediarios reducidos. Los autores reportaron una mejora significativa en la eficiencia fotocatalítica, asociada a una menor recombinación electrón-hueco y a una mayor disponibilidad de electrones para las reacciones de reducción multi electrónicas.

De manera complementaria, otros estudios desarrollados por el mismo grupo de investigación han mostrado que la modificación superficial y la incorporación de co-catalizadores metálicos permiten dirigir la selectividad del proceso, favoreciendo la formación de productos

específicos frente a la evolución competitiva de H<sub>2</sub> [14].

El análisis conjunto de estos trabajos evidencia que la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> representa uno de los retos más complejos dentro de la fotocatalisis, debido a la elevada estabilidad termodinámica de la molécula y a la necesidad de transferencias electrónicas múltiples. En este contexto, los resultados reportados por Quiroz-Cardoso *et al.*, demuestran que la ingeniería de interfaces es un factor determinante para mejorar tanto la eficiencia como la selectividad del proceso [14]. El uso de Ni como co-catalizador permite disminuir la energía de activación del CO<sub>2</sub>, promoviendo su adsorción y la estabilización de intermediarios como CO<sub>2</sub><sup>•-</sup> y HCOO<sup>-</sup>. Por su parte, el GO actúa como un mediador electrónico, facilitando la migración de electrones desde el TiO<sub>2</sub> hacia los sitios activos metálicos y reduciendo la recombinación de cargas. Esta sinergia explica la mayor producción de metanol observada frente a sistemas sin GO o sin Ni [14].

No obstante, los autores señalan que la competencia con la evolución de H<sub>2</sub> continúa siendo una limitación importante, especialmente en sistemas acuosos. Este aspecto pone de manifiesto la necesidad de un control más preciso de la estructura electrónica del semiconductor y de la naturaleza de los co-catalizadores, con el fin



de dirigir selectivamente los electrones hacia la reducción de  $\text{CO}_2$ .

En conjunto, estos estudios confirman que la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  requiere un diseño integral del material, donde la absorción de luz, la separación de cargas y la activación superficial del  $\text{CO}_2$  estén estrechamente acopladas. Si bien, los

avances son significativos, el proceso aún enfrenta desafíos relacionados con la eficiencia cuántica y la estabilidad a largo plazo, lo que abre oportunidades para el desarrollo de nuevos sistemas híbridos y multifuncionales.

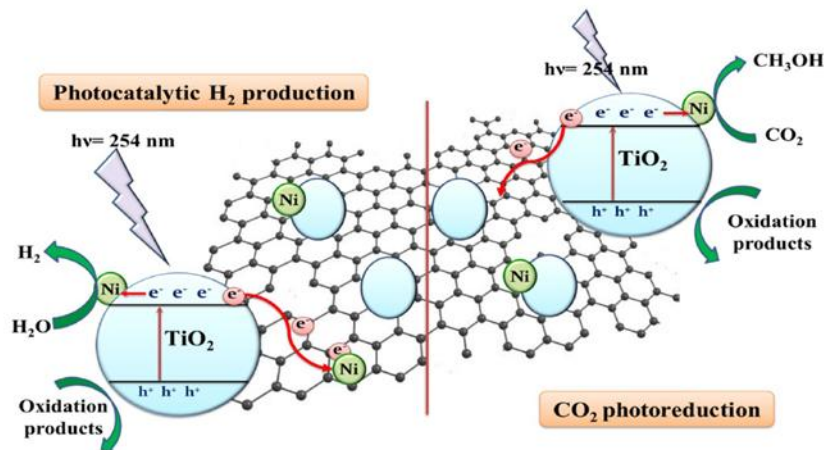


Figura 4. Esquema sobre la producción fotocatalítica de  $\text{H}_2$  y reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  sobre Ni/GO-TiO<sub>2</sub> bajo luz UV.

#### 4. Conclusiones

En esta revisión bibliográfica, se analizó el avance de la fotocatalisis heterogénea en aplicaciones ambientales y energéticas, incluyendo la degradación de colorantes orgánicos, la oxidación de arsénico, la producción fotocatalítica de  $\text{H}_2$  y la reducción de  $\text{CO}_2$ . A partir de los trabajos revisados, se confirma que la eficiencia de estos procesos no depende exclusivamente del semiconductor puro, sino del diseño integral de materiales, donde la estructura electrónica, la química superficial, el área específica y la estabilidad juegan un papel importante.

En la degradación de colorantes, los resultados evidencian que la modificación del  $\text{TiO}_2$  mediante soportes inertes, dopaje y heterouniones semiconductoras permite mejorar la separación de cargas y ampliar la absorción hacia la región visible, incrementando la eficiencia y estabilidad del proceso. Estas estrategias representan un avance importante hacia el tratamiento fotocatalítico de aguas residuales bajo

condiciones más cercanas a la radiación solar.

Para el caso del arsénico, los estudios muestran una evolución clara desde sistemas enfocados únicamente en la oxidación de As(III) hacia materiales capaces de integrar oxidación y adsorción del contaminante. En particular, los MMO derivados de HDL destacan por su capacidad de combinar alta actividad fotocatalítica, adsorción efectiva y buena estabilidad, superando una de las principales limitaciones de los sistemas basados exclusivamente en  $\text{TiO}_2$  puro y modificado.

En la producción fotocatalítica de  $\text{H}_2$ , los trabajos revisados demuestran que es posible alcanzar altas tasas de generación empleando sistemas libres de metales nobles, mediante el diseño racional de heterouniones y materiales derivados de HDL. Estos resultados refuerzan la viabilidad de enfoques más sostenibles y económicamente competitivos para la generación de energía limpia.



Finalmente, en la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ , se evidencia que la ingeniería de interfaces y el uso de co-catalizadores son esenciales para mejorar la activación del  $\text{CO}_2$  y dirigir la selectividad del proceso, aunque persisten desafíos asociados a la eficiencia cuántica y a la competencia con la evolución de  $\text{H}_2$ .

En conjunto, esta revisión pone de manifiesto que el futuro de la fotocatalisis reside en el desarrollo de materiales multifuncionales y estrategias integradas, así como en la evaluación bajo condiciones de operación más realistas, lo que permitirá avanzar hacia aplicaciones tecnológicas viables y sostenibles.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Contribución de los autores:** Conceptualización, V.S. y M.S.; metodología, V.S.; validación, L.M. y S.C.; investigación, F.T.; redacción: revisión y edición, L.M.; visualización, M.S.; supervisión, S.C. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

**Agradecimientos:** Luis Angel May Ix agradece a SECIHTI – México por la beca “Estancias Posdoctorales por México EPM(1) 2024” que hizo posible esta investigación.

## Referencias

- [1] Kudo A, Miseki Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chem. Soc. Rev.* 2009; 38:253–278.
- [2] Hoffmann MR, Martin ST, Choi W, Bahnemann DW. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chem. Rev.* 1995; 95:69–96.
- [3] Chong MN, Jin B, Chow CWK, Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Res.* 2010; 44:2997–3027.

- [4] Herrmann JM. Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions. *Appl. Catal. B: Environ.* 2010; 99:461–468.

- [5] Estrella González A, Azomoza M, Arellano U, Cipagauta Díaz S, Solís S. Preparation and characterization of phosphate-modified mesoporous  $\text{TiO}_2$  incorporated in a silica matrix and their photocatalytic properties in the photodegradation of Congo red. *Front. Mater. Sci.* 2017; 11(3):250-261.

- [6] Cipagauta-Díaz S, Estrella-González A, Navarrete-Magaña M, Gómez R. N doped- $\text{TiO}_2$  coupled to  $\text{BiVO}_4$  high performance in photodegradation of Oflaxacin antibiotic and Rhodamine B dye under visible light. *Catal. Today.* 2022; 394–396:445–457.

- [7] May-Ix LA, Gómez R, López R. Photocatalytic oxidation of As(III) using  $\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  semiconductors. In: *One Century of the discovery of Arsenicosis in Latin America (1914-2014)*. CRC Press, London, 811-813.

- [8] Navarrete-Magaña M, Estrella-González A, May-Ix L, Cipagauta-Díaz S, Gómez R. Photocatalytic oxidation of arsenite using  $\text{WO}_3/\text{TiO}_2$  nanomaterials synthesized by the sol-gel method. *J. Environ. Manage.* 2021; 282:111602.

- [9] May-Ix LA, Cipagauta-Díaz S, Tzompantzi F, Pérez Hernández R, Meichtry JM, Halac EB, Litter MI. Arsenite removal by using ZnAlFe mixed metal oxides derived from layered double hydroxides. *Chemosphere.* 2024; 368:143694.

- [10] WHO, 2017. Guidelines for drinking water quality. 4th Edition Incorporating the First Addendum. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 978-92-4-154995-0.

- [11] Navarrete M, Cipagauta-Díaz S, Gómez R.  $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  semiconductors free of noble metals for the photocatalytic production of



hydrogen. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2019; 94:3457–3465.

[12] Suárez-Quezada M, Suárez-Quezada VM, Tobola-Inchaurregui F, Oros-Ruíz S, Cipagauta-Díaz S. Hydrogen production through water splitting using Zn–Al–In mixed metal oxides nanocomposite photocatalysts induced by visible light. *Catalysts*. 2024; 14:835.

[13] Gómez-Cholula D, Carrera-Crespo E, Suárez VM, Cipagauta-Díaz S, Tzompantzi-Morales FJ. Enhanced hydrogen production using EDTA-modified bismuth oxyhalide via visible light photocatalysis. *Catal. Lett.* 2025; 155:224.

[14] Quiroz-Cardoso O, Suárez V, Oros-Ruíz S, Quintana M, Ramírez-Rave S, Suárez-Quezada M, Gómez R. Synthesis of Ni/GO–TiO<sub>2</sub> composites for the photocatalytic hydrogen production and CO<sub>2</sub> reduction to methanol. *Top. Catal.* 2022; 65:1015–1027.