

## Fotocatálisis, la ¿nueva? química verde

Juana Suárez García<sup>1</sup>, Mario Valle Sánchez<sup>2</sup>, Erick Cuevas Yáñez<sup>2</sup>

Los seres vivos que habitamos el planeta hemos convivido desde siempre con la luz del sol, del cual no sólo tenemos iluminación y calor, sino que nuestra vida misma depende de esta fuente de energía que, si bien no es inagotable, aún podemos disfrutar de ella unos cuantos millones de años más. Hablando en estos términos podemos comenzar a preguntarnos: ¿Cuánta energía tiene la luz?

¿Cómo puede usarse esa energía? ¿Hemos hecho algo para aprovecharla?

Químicamente hablando, el interés despierta con las observaciones de Giacomo Ciamician y Henri Becquerel, (Nebbia & Kauffman, 2007; Yang & Wang, 2018) cuando de manera separada, observaron que había ciertas sustancias que tenían transformaciones al exponerse a los rayos del sol, desafortunadamente para ellos, hace más de cien años no existían las herramientas analíticas y tecnológicas que les permitieran confirmar sus hallazgos. Actualmente se sabe que la energía solar puede convertirse en energía química, como resultado de procesos antena como lo es la fotosíntesis, además, el uso de la luz permite llevar a cabo procesos que se emplean en diversas áreas, resaltando el tratamiento de aguas residuales, ya que las especies activas que se producen (radicales libres) por medio de la fotólisis (rompimiento activado de moléculas activado por la luz) tiene un efecto bactericida que nos permite potabilizar el agua después de otros tratamientos. (Vargas et al., 2019).

### Aprendiendo del maestro: LA NATURALEZA

La luz solar es un protagonista importante en el proceso vital llamado fotosíntesis; mecanismo que conlleva una serie de reacciones químicas que ocurren diariamente, tanto en plantas (en las estructuras vegetales llamadas hojas) como en algunas bacterias.

Unos pequeños complejos llamados cloroplastos almacenan el pigmento verde llamado clorofila, que tiene una capacidad única para atrapar la energía de la luz y utilizarla en la fotólisis de las moléculas de agua, entonces se genera una nueva especie de energía llamada electroquímica que promueve la generación ATP y NADPH (las monedas energéticas de las células), culminando con el proceso al generar carbohidratos y oxígeno, que son indispensables para la vida en el planeta. (Beall, 1996; Heldt & Heldt, 2005; Rodríguez et al., 2005).

Aunque pareciera que la luz funciona como el combustible que hace funcionar la maquinaria química de los seres vivos, lo cierto es que va más allá siendo este proceso la evidencia de que la luz facilita las reacciones químicas, contexto que más tarde se integra a la definición de fotocatálisis “reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, que acelera la velocidad de reacción”. (Heldt & Heldt, 2005).

### ¿Cómo promueve la luz una reacción química?

La luz es concebida como fotones, que contienen la energía necesaria para catalizar una reacción química, pero ¿Cómo es que contienen esa energía, como la adquieren? la respuesta está en el movimiento que presenta el electrón entre orbitales electrónicos. Si un electrón recibe un cuanto (energía), es promovido a orbitales superiores (estado excitado), cuando este electrón es regresado a su estado fundamental u original el paquete de energía adquirido es regresado en forma de radiación electromagnética y la longitud de onda de esta radiación depende de la cantidad de energía desprendida, que si cae en el rango de luz visible se percibe como luz (color,

fluorescencia, fosforescencia, vibraciones). (Beall, 1996).

En las reacciones de fotocátalisis que es considerada la fotosíntesis artificial, podemos apreciar como la luz es captada y esta activa a un catalizador que por lo general es un metal, el cual absorbe la luz, generando electrones (especies reactivas) y huecos, ya que el electrón promovido deja un espacio en la banda de valencia, ambos pueden reaccionar. (Hassaan et al., 2023).

En la fotocátalisis gran parte de los fotocatalizadores tiene la característica de ser semiconductores, que generan partículas cargadas eléctricamente al ser estimulados con la energía indispensable.

El material semiconductor presenta estados de energía:

- Estados de energía llenos (bandas de valencia)
- Estados de energía vacíos (bandas de conducción)

Entre estos dos estados de energía se ubica la zona de banda prohibida o ancho de banda óptico (abismo energético o *bandgap*), del cual dependen las características electrónicas del material, si es mayor a 4 eV es denominado dieléctrico y si es igual o cercano a cero se le denomina metal en cualquier otra circunstancia se denomina semiconductor. (Rodríguez et al., 2005) (Ilustración 1).

REDUCTORES	REDOX	OXIDATIVOS
<ul style="list-style-type: none"><li>CdTe <math>E_g=1.4\text{eV}</math></li><li>CdSe <math>E_g=1.7\text{eV}</math></li><li>Si <math>E_g=1.1\text{eV}</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>CdS <math>E_g=2.4\text{eV}</math></li><li>SrTiO<sub>3</sub> <math>E_g=3.2\text{eV}</math></li><li>TiO<sub>2</sub> <math>E_g=3.2\text{eV}</math></li><li>ZnO <math>E_g=3.2\text{eV}</math></li><li>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> <math>E_g=3.4\text{eV}</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <math>E_g=2.3\text{eV}</math></li><li>WO<sub>3</sub> <math>E_g=2.8\text{eV}</math></li><li>SnO<sub>2</sub> <math>E_g=3.5\text{eV}</math></li></ul>

Ilustración 1: Ejemplos de semiconductores y su potencial redox expresado en eV.

### ¿Qué sucede cuando llega la luz?

Cuando llega la luz en una reacción de fotocátalisis, la energía la recibe el fotocatalizador el cual es activado por la

longitud de onda adecuada, sabiendo que un electrón en la banda de conducción puede usarse para reducir cualquier sustrato, mientras que en un agujero en la banda de valencia se puede utilizar para oxidar una variedad de sustancias.

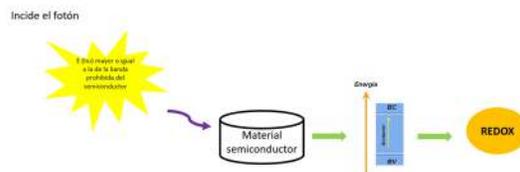


Ilustración 2: Mecanismo general de la fotocátalisis.

Dependiendo del proceso al cual se quiera aplicar se ha desarrollado la fotocátalisis homogénea y heterogénea, la primera involucra: Photo-Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, sulfatos ferrosos y luz UV), proceso Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y sulfatos ferrosos) y fotólisis directa (solo UV). El proceso fotocatalítico heterogéneo se caracteriza por utilizar metales, por ejemplo (TiO<sub>2</sub>/UV).

### Aplicaciones de la fotocátalisis, la nueva química verde

La energía obtenida de la luz a través de la fotocátalisis puede oxidar o reducir contaminantes estimulando la transferencia de excitación de electrones en un fotocatalizador semiconductor, para limpiar aguas residuales de compuestos químicos contaminantes. (Antonopoulou et al., 2021) El impacto que tiene este tipo de procesos va más allá, ya que la luz puede promover reacciones químicas, resulta ser una opción ecológica y energéticamente eficiente, aplicándose en transformaciones químicas desde oxidaciones y reducciones simples hasta reacciones de formación de enlaces carbono-heteroátomo. (König, 2017).

En la síntesis orgánica, las condiciones de la reacción fotocatalítica, minimiza el riesgo de formación de subproductos inducidos por la luz. Estas simplificaciones de las condiciones de reacción también dan como resultado una mayor tolerancia de los grupos funcionales y minimizan la necesidad de realizar

purificaciones posteriores complicadas o de proteger los grupos funcionales y la velocidad de reacción también dependerá del suministro de fotones, añadiendo que el uso de luz solar permite que la reacción se lleve a cabo a temperatura ambiente y estudios más recientes también han detectado el uso de fotones de menor energía; por ejemplo, UV-A, luz visible e incluso NIR (infrarrojo cercano); útiles en las transformaciones químicas, lo que conlleva a una síntesis química más amigable con el ambiente. (Noël & Zysman-Colman, 2022).

La mayoría de los procesos fotoquímicos se apegan a los principios de la química verde, las condiciones fotocatalíticas que utilizan todo el espectro de luz visible permiten una recolección eficiente de energía solar y son clave para realizar reacciones fotoquímicas sostenibles en lugar de fuentes de luz artificial, además de las aplicaciones impactantes en la materia ambiental demuestran la importancia de seguir la investigación y avances en el área, prometiendo un futuro ecológico y proambiental en el área de síntesis orgánica.

**Palabras clave:** Fotocatálisis, Química verde.

<sup>1</sup>**Juana Suárez García:** Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Toluca, Estado de México, México. **Contacto:** [ecuevasy@uaemex.mx](mailto:ecuevasy@uaemex.mx)

<sup>2</sup>**Mario Valle Sánchez:** Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Toluca, Estado de México, México. **Contacto:** [ecuevasy@uaemex.mx](mailto:ecuevasy@uaemex.mx)

<sup>3</sup>**Erick Cuevas Yáñez:** Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Toluca, Estado de México, México. **Contacto:** [ecuevasy@uaemex.mx](mailto:ecuevasy@uaemex.mx)

#### Referencias bibliográficas

- Antonopoulou, M., Kosma, C., Albanis, T., & Konstantinou, I. (2021). An overview of homogeneous and heterogeneous photocatalysis applications for the removal of pharmaceutical compounds from real or synthetic hospital wastewaters under lab or pilot scale. *Science of The Total Environment*, 765, 144163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144163>
- Beall, H. (1996). Report on the WPI Conference: General Chemistry and Materials Science: The Interrelationships. *Journal of Chemical Education*, 73(8), 756. <https://doi.org/10.1021/ed073p756>
- Hassaan, M. A., El-Nemr, M. A., Elkatory, M. R., Ragab, S., Niculescu, V. C., & El Nemr, A. (2023). Principles of Photocatalysts and Their Different Applications: A Review. *Topics in Current Chemistry*, 381(6), 31. <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7>
- Heldt, H.-W., & Heldt, F. (2005). The use of energy from sunlight by photosynthesis is the basis of life on earth. In

- H.-W. Heldt & F. B. T.-P. B. (Third E. Heldt (Eds.), *Plant Biochemistry* (pp. 45–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012088391-2/50003-1>
- König, B. (2017). Photocatalysis in Organic Synthesis – Past, Present, and Future. *European Journal of Organic Chemistry*, 2017(15), 1979–1981. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ejoc.201700420>
- Nebbia, G., & Kauffman, G. (2007). Prophet of Solar Energy: A Retrospective View of Giacomo Luigi Ciamician (1857–1922), the Founder of Green Chemistry, on the 150th Anniversary of His Birth. *Chem. Educ.*, 12.
- Noël, T., & Zysman-Colman, E. (2022). The promise and pitfalls of photocatalysis for organic synthesis. *Chem Catalysis*, 2(3), 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.cheecat.2021.12.015>
- Rodríguez, J., Candal, R., Solis, J., Estrada, W., & Blesa, M. (2005). El fotocatalizador: Síntesis, propiedades y limitaciones. In *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua* (pp. 135–152). UNSAM.
- Vargas, D. D. C., Poot, V. M., & Espinoza, J. E. R. (2019). Luz solar y TiO<sub>2</sub> para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatalisis. *Ingeniería*, 23(1).
- Yang, X., & Wang, D. (2018). Photocatalysis: From Fundamental Principles to Materials and Applications. *ACS Applied Energy Materials*, 1(12), 6657–6693. <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01345>