

TRATAMIENTO DE AGUA CONTAMINADA POR FOTOCATÁLISIS SOLAR

ROJAS GARCÍA, E., RUIZ MARTÍNEZ, R.S., GALINDO LUNA, Y.R.

INTRODUCCIÓN

Alrededor de 70 % de la superficie de nuestro planeta está ocupada por agua, siendo esta un componente esencial para la vida. El agua tiene un ciclo natural que de ser alterado puede afectar ecosistemas y su biodiversidad, así como la calidad de vida de la población aledaña. A nivel mundial se observa un incremento de población que demanda más alimentos y recursos energéticos, así como mayores volúmenes de agua, tanto para población como para una creciente actividad productiva. Desafortunadamente el incremento en la demanda de agua provocó que en algunas regiones una sobre explotación de los recursos hídricos que ha afectado la calidad de las fuentes naturales disponibles.

El problema no sólo estriba en un aumento en la demanda creciente de agua de calidad, sino en un incremento en la generación de aguas residuales, las cuales frecuentemente son vertidas sin tratamiento en ríos y lagos, provocando así su contaminación y afectando su disponibilidad. Se ha reportado que a nivel mundial alrededor del 90 % del agua residual se vierte a cuerpos de agua superficiales sin tratamiento previo (Conagua, 2015).



Figura 1. Contaminación de río por agua residual industrial (Olguín y Rojas, 2017).

El agua puede encontrarse con una diversidad de contaminantes y provenir de una variedad de fuentes. Por ejemplo, podemos tener contaminantes que surgen de actividades humanas como residuos industriales, o de la agricultura, como son los fertilizantes y pesticidas. Otros contaminantes pueden originarse en fuentes naturales, como son minerales o compuestos tales como metales pesados y sales diversas.

Otra clase de contaminantes serían los organismos patógenos como bacterias, virus y hongos causantes de enfermedades. Como sería de esperarse, dada la diversidad de contaminantes el método para el tratamiento del agua dependerá del origen de ésta, pero también de su uso o destino final. Hay procesos de tratamientos que permiten eliminar sustancias dañinas, como son los procesos biológicos, y que se emplean para eliminar contaminantes orgánicos. Sin embargo, se ha encontrado que estos no son propicios para eliminar ciertas moléculas contaminantes como el benceno y derivados, diversos colorantes sintéticos, pesticidas, entre otros. Existen otros métodos de tratamiento como son los procesos físicos y los químicos, cada uno de ellos con sus respectivas ventajas y desventajas (Liu et. al., 2022), sin embargo en varios de ellos se tiene la desventaja de generar residuos que requieren tratamiento posterior. Un método de tratamiento que ha recibido bastante atención más recientemente se basa en la degradación y eliminación de contaminantes empleando un enfoque fotocatalítico, el cual se basa en emplear fotones de luz de cierta energía para promover reacciones químicas dirigidas a eliminar el contaminante. Esta tecnología se caracteriza por ser de bajo costo, amigable con el ambiente y ofrecer altos desempeños de degradación de contaminantes, además, opera a temperatura y presión ambiente y no genera residuos como sucede con otras tecnologías (Dewil et al., 2017).

En esta tecnología, aparte de requerir luz, solar o artificial, emplea materiales catalíticos, que ayudan a transformar los contaminantes orgánicos en CO₂ y agua. Estos materiales, llamados catalizadores, participan absorbiendo la energía de fotones de luz para generar moléculas altamente reactivas que atacan y degradan los contaminantes. Diversos materiales han sido empleando fotocatalizadores tales como TiO₂, ZnO, SnO₂, entre muchos otros. Por sus diversas cualidades, un material ampliamente empleado como fotocatalizador es el óxido de titanio (TiO₂), entre las cuales está su estabilidad fotoquímica, baja toxicidad, bajo costo y su capacidad de degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos, entre otras. Sin embargo, existe margen de mejora de estos catalizadores pues muchos de ellos se activan sólo con luz ultravioleta, que representa únicamente un 5 % del espectro de luz solar, y un reto importante es lograr que puedan ser más eficientes en aprovechar la luz visible e infrarroja, que en conjunto representan cerca del 95 % restante del espectro de energía solar (Zare et al., 2021).



Figura 2. Planta fotocatalítica solar (Nishiyama et al., 2021).

El empleo de la luz solar en fotocátalisis ha mostrado ser una opción económica y ecológicamente viable para atender diversos problemas de contaminación de agua y algunos ejemplos nos permitirán ilustrar su importancia (Al-Nauim et al., 2023).

ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS

La fotocátalisis solar se ha empleado para atacar el problema de la presencia de microorganismos patógenos en agua residual que provocan enfermedades gastrointestinales, pues se ha reportado su efectividad para matar bacterias en agua. Con esta tecnología, se generan radicales libres altamente reactivos que atacan y rompen la membrana celular de las bacterias, provocando liberación de los organelos y muerte del microorganismo. Hay estudios de desactivación fotocatalítica de la bacteria *Escherichia coli* que reportan su degradación a niveles superiores al 99 %, con solo dos horas bajo luz solar (Gogniat et al., 2006).

DEGRADACIÓN DE PESTICIDAS

Estos productos se emplean en variedad de operaciones relacionadas a la agricultura, desde el cultivo hasta el almacenaje de frutas y verduras. Desafortunadamente, estos productos son también una fuente importante de contaminación de agua. Los pesticidas son tóxicos y por su estructura química resistentes a la degradación biológica, por lo que tienden a acumularse en el ambiente y representar un peligro para la salud humana. Existen trabajos experimentales que muestran que, con el catalizador indicado, la degradación de pesticidas en agua puede lograrse mediante fotocátalisis. A manera de ejemplo, estudios con luz visible sobre la degradación fotocatalítica de atrazina (un herbicida de amplio uso), han demostrado la viabilidad de esta tecnología para degradar completamente esta clase de contaminantes (Liu et al., 2020).



Figura 3. Secuencia en el tiempo de la degradación de agua contaminada con colorante NR5 por fotocátalisis solar.

DEGRADACIÓN DE COLORANTES

Existe una gran variedad de colorantes que se emplean a nivel industrial. Entre ellas, la industria textil es identificada como altamente demandante y contaminante de agua. Desafortunadamente la mayoría de los colorantes no son biodegradables y representan un riesgo al ambiente. Debido a la importancia que reviste este tipo de contaminantes en muchos países se ha evaluado el uso de la fotocátalisis como tecnología para degradar y poder eliminarlos de aguas residuales. Los colorantes textiles suelen ser moléculas altamente estables difíciles de degradar por métodos convencionales, pero diversos trabajos han encontrado que es posible tratar estos contaminantes por medio de fotocátalisis solar. Como se constata en un estudio reciente realizado en la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México, se reportó un 98 % de degradación del colorante textil Negro Reactivo 5 (NR5) en una planta piloto solar, en un tiempo de 3.5 horas (Cruz Antonio et al., 2023).

CONCLUSIONES

El empleo de procesos fotocatalíticos para el tratamiento de aguas contaminadas ha recibido bastante atención recientemente. Esta tecnología cuenta con varias ventajas como operar a temperatura y presión ambiente, no generar residuos adicionales, ser de bajo costo, de relativamente fácil implementación, entre otras. Sin embargo, a nivel industrial el principal gasto de operación de plantas de tratamiento fotocatalítico de aguas contaminadas se ubica en el empleo de lámparas artificiales de luz, y es por ello que el empleo de luz solar se presenta como una alternativa económica y ecológica como fuente de luz para el proceso. La tecnología ha sido probada principalmente bajo condiciones de laboratorio y para tratar agua de origen sintético con un solo contaminante, por lo que la futura investigación debe evaluar la eficacia en la degradación de contaminantes en aguas residuales reales.

REFERENCIAS

1. Al-Nuaim, M.A., Alwasiti, A.A., Shnain, Z.Y. (2023) The photocatalytic process in the treatment of polluted water. *Chemical Papers* 77: 677-701. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02468-7>
2. Conagua, Semarnat. Situación del Subsector de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2015. Conagua, Semarnat. México. 2015.
3. Cruz Antonio, T., Gómez García, C., Rojas García, E., Ruiz Martínez R. (2023). Degradación solar de un colorante por fotocátalisis a nivel planta piloto. *Avances en Ingeniería Química*, Vol. 2, No.1. V4, 580-585.
4. Dewil R, Mantzavinos D, Poullos I, Rodrigo MA (2017) New perspectives for advanced oxidation processes. *J Environ Manag* (195):93-99 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.010>
5. Gogniat G, Thyssen M, Denis M, Pulgarin C, Dukan S (2006) The bactericidal effect of TiO₂ photocatalysis involves adsorption onto catalyst and the loss of membrane integrity. *FEMS Microbiol Lett* 258:18-24. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00190.x>
6. Liu K, Chen J, Sun F, Liu Y, Tang M, Yang Y (2022) Historical development and prospect of intimately coupling photocatalysis and biological technology for pollutant treatment in sewage: a review. *Sci Total Environ* 835:155482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155482>
7. Liu H, Qiu H (2020) Recent advances of 3D graphene-based adsorbents for sample preparation of water pollutants: a review. *Chem Eng J* 393:124691. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124691>
8. Nishiyama, H., Yamada, T., Nakabayashi, M. et al. (2021) Photocatalytic solar hydrogen production from water on a 100-m² scale. *Nature* 598, 304-307. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03907-3>
9. Olguín, M., Rojas, D. (2017) La producción de mezclilla contamina el río Atoyac. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/la-produccion-de-mezclilla-contamina-el-rio-atoyac/
10. Zare E, Khan M, Iftekhar S, Park Y, Joseph J, Srivastava V, Makvandi P, Sillanpaa M, Varma R (2021) An overview on non-spherical semiconductors for heterogeneous photocatalytic degradation of organic water contaminants. *Chemosphere J Homepage*, www.elsevier.com/locate/chemosphere
11. Nishiyama, H., Yamada, T., Nakabayashi, M. et al. Photocatalytic solar hydrogen production from water on a 100-m² scale. *Nature* 598, 304-307 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03907-3>