

# Proceso Foto-Fenton con materiales de hierro magnéticos para la degradación de colorantes azoicos: caso del Rojo Directo 28

Ángel Gabriel López-Abúndez<sup>1</sup>, Erandi López-Beltrán<sup>1</sup>, Dulce Laura Martínez-Valdez<sup>1</sup>, Dafne Quetzali Rodríguez-Bebia<sup>1</sup>, Adriana Benítez-Rico<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad La Salle México, Facultad de Ciencias Químicas. Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Universidad La Salle México, Vicerrectoría de Investigación. Ciudad de México, México.

ag.lopeza@lasallistas.org.mx, lopez.e@lasallistas.org.mx,  
dulce.martinez@lasallistas.org.mx, dafne-rodriguez@lasallistas.org.mx,  
adriana.benitez@lasalle.mx

## Resumen.

Actualmente, la contaminación del agua por colorantes de textiles es un problema ambiental, ya que afecta a la vida de ecosistemas tanto submarinos como terrestres por el gran volumen de efluentes generados por la industria con alta visibilidad, persistencia y toxicidad. El tratamiento de colorantes de la industria textil es un reto científico y tecnológico debido a que son compuestos que poseen estructuras químicas complejas que dificultan su degradación de forma natural, además existen más de diez mil tipos de colorantes utilizados en diversas industrias que pueden requerir un enfoque diferente para su tratamiento generando una necesidad de tecnologías específicas. Para resolver esta problemática, en este trabajo se propone la síntesis de materiales magnéticos basados en hierro capaces de catalizar procesos de oxidación de contaminantes del agua que presentan ventajas sobre otros materiales por su capacidad de recuperación y reutilización debido a sus propiedades magnéticas. Se presentan resultados sobre síntesis de materiales y diseño de una metodología innovadora para descontaminación de los colorantes tomando como base el colorante con estructura azoica Rojo Directo 28 en un proceso de oxidación avanzado a través de la reacción fotoquímica conocida como foto-Fenton demostrando la viabilidad de esta tecnología como alternativa ecológica y eficaz en el tratamiento de aguas residuales industriales.

**Palabras Clave:** catalizador magnético, descontaminación, colorantes.

## 1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

La contaminación del agua por colorantes provenientes de la industria textil representa una amenaza para el medio ambiente y la salud humana. Anualmente, esta industria libera aproximadamente 280,000 toneladas de colorantes sintéticos en los efluentes acuáticos globales. Los colorantes azoicos, caracterizados por su enlace  $-N=N-$ , constituyen hasta el 70<sup>[1]</sup> de todos los colorantes textiles y son particularmente problemáticos debido a su estructura química compleja y resistente a la degradación.

La persistencia de estos colorantes en el agua no solo altera la estética de los cuerpos de agua, sino que también interfiere con la penetración de la luz solar, afectando severamente los procesos fotosintéticos de la flora acuática. Esto desencadena una reacción en cadena que perturba todo

---

Memorias del Concurso Lasallista de Investigación, Desarrollo e innovación

Vol. XI, Núm. 1, pp. DyT 157-162, 2024, DOI: 10.26457/mclidi.v11i1.4293 Universidad La Salle México.

ÁNGEL GABRIEL LÓPEZ ABÚNDEZ, ERANDI LÓPEZ BELTRÁN, DULCE LAURA MARTÍNEZ VALDEZ, RODRIGUEZ BEBIA DAFNE QUETZALI de la carrera en INGENIERÍA QUÍMICA de la UNIVERSIDAD LA SALLE MÉXICO.

ADRIANA BENÍTEZ RICO fue la asesora de este trabajo.

el ecosistema, reduciendo los niveles de oxígeno disuelto y amenazando la supervivencia de la fauna acuática.

Además, muchos de estos colorantes y sus subproductos de degradación son tóxicos, mutagénicos y carcinogénicos para diversas formas de vida. La contaminación por colorantes compromete la disponibilidad de agua potable, ya que los métodos convencionales de tratamiento de agua suelen ser ineficaces para eliminar estos compuestos.

Este trabajo contribuye directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: Agua Limpia y Saneamiento. Al abordar la contaminación por colorantes textiles, se busca mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación y la eliminación de vertidos peligrosos, alineándose con la meta 6.3 del ODS 6.

Frente a este desafío, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) resultan una alternativa prometedora y ambientalmente amigable para la descontaminación de aguas con colorantes. Entre otros POA, el proceso foto-Fenton destaca por su eficacia en la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes como los colorantes azoicos. El proceso catalítico foto-Fenton combina la acción del peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), sales de hierro y radiación UV o luz solar para generar radicales hidroxilos altamente reactivos. Estos radicales son capaces de oxidar y mineralizar eficientemente los contaminantes orgánicos, convirtiéndolos en compuestos inofensivos como  $CO_2$  y  $H_2O$ . Las reacciones foto-Fenton y el ciclo catalítico se pueden apreciar en la Figura 1.

Una innovación significativa en este trabajo es la síntesis y el uso de un catalizador a base de hierro con propiedades magnéticas permanentes. Esta característica facilita la recuperación del catalizador después del tratamiento para su reutilización, siendo esta una ventaja considerable sobre otros catalizadores convencionales, ya que muchos son costosos limitando su uso en la industria donde se requiere un tratamiento eficiente y económicamente viable. Además, al ser extraído este mismo no representaría un peligro de contaminación secundaria al tratamiento para el ecosistema.

## 2 Objetivo

Sintetizar materiales magnéticos basados en hierro como catalizadores para el proceso foto-Fenton, evaluando la degradación y descontaminación del colorante industrial Rojo Directo 28 en soluciones acuosas.

## 3 Propuesta teórico-metodológica

La síntesis del catalizador se realizó a partir de sulfato de hierro (II) ( $FeSO_4$ ) y cloruro de hierro (III) ( $FeCl_3$ ), los cuales se llevaron a disolución acuosa en presencia de agitación y calentamiento a  $80\text{ }^\circ\text{C}$  por aproximadamente 15 min, posteriormente se dejó enfriar la solución a temperatura ambiente y en presencia de agitación se añadió hidróxido de amonio ( $NH_4OH$ ) hasta llegar a pH 10. El precipitado obtenido se separó de la fase líquida con decantación y evaporación.

El tratamiento foto-Fenton se realizó en un reactor Batch con dos muestras de 50 mL de una disolución de Rojo Directo 28 a 100 ppm. Una de estas muestras se manejó como blanco y a la otra se le añadieron 30 mg del catalizador sintetizado. Posteriormente, al cumplirse 30 min de equilibrio absorción-desorción en oscuridad se tomó una segunda alícuota y a ambas muestras se les añadieron 30  $\mu\text{L}$  de  $H_2O_2$  dando inicio al tratamiento fotocatalítico del tipo foto-fenton donde en presencia de agitación se les incidió luz UV de 265 nm y 8 Watts de potencia durante cuatro

horas ininterrumpidas y una toma de alícuotas desde el inicio del proceso y en periodos de 30 min como monitoreo de la degradación analizándolas por medio del uso de un equipo de espectroscopía UV-Vis.

#### 4 Discusión de resultados

La síntesis permitió obtener un material sólido con las propiedades magnéticas deseables, estable químicamente para las condiciones del proceso foto-Fenton y los resultados del proceso catalítico dan lugar a aguas tratadas que cumplen con la NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997 conocer los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas. En la Figura 2, se observa la muestra obtenida cuando es sometida a un imán, se aprecia la alineación de cada grano al campo magnético demostrando que se obtuvieron muestras con hierro (Fe) que alimentan el proceso foto-Fenton y con comportamiento magnético permanente. En la Figura 3, se observan los espectros de ultravioleta- visible obtenidos del colorante Rojo Directo 28 sometidos al proceso foto-Fenton en función del tiempo, se aprecia una disminución en la absorbancia en las longitudes de onda a lo largo del tiempo. Las dos líneas verticales indican las longitudes de onda específicas (335.7 nm y 490.1 nm) donde se monitorea la degradación. La disminución de la absorbancia está relacionada con la Ley de Lambert-Beer, si la concentración del colorante disminuye, la absorbancia también disminuye proporcionalmente confirmando que el sistema a las condiciones establecidas es eficiente para descomponer el colorante

En la Figura 5, se observa que la absorbancia disminuye con el tiempo, lo que indica que el colorante se está degradando. Esto es evidente ya que se muestran dos rectas descendentes con una pendiente negativa. Por lo que el catalizador acelera la degradación del colorante, lo que sugiere que puede ser un catalizador efectivo para la degradación de colorantes siendo una forma de reducir la contaminación del agua, especialmente en áreas donde este sea un problema grave. Además, la posibilidad de la reutilización del catalizador sin perder su actividad reduce la cantidad de residuos generados y promueve la producción y consumo responsables.

Los resultados presentados muestran una efectiva degradación del colorante Rojo Directo 28, que posee una estructura compleja de tipo azoica y no suele degradarse en condiciones ambientales, demostramos una rápida decoloración y una fácil recuperación-reutilización del catalizador, por lo que el sistema de estudio es prometedor para aplicación práctica en tratamientos de aguas residuales de la industria textil.

#### 5 Conclusiones y perspectivas futuras

En este estudio, se ha abordado la pregunta de investigación sobre la viabilidad y eficacia de sintetizar fases estables magnéticas para alimentar procesos Foto-Fenton, y el diseño de una metodología innovadora para tratar colorantes azoicos. Se cumplió con el objetivo propuesto, evidenciando que las fases magnéticas sintetizadas son efectivas para ello y que la metodología diseñada es viable y ofrece una nueva perspectiva en el tratamiento de aguas residuales.

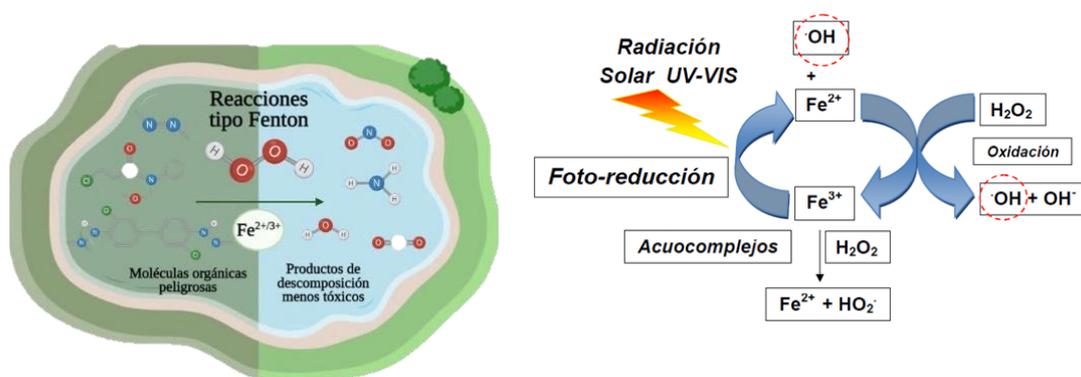
El trabajo realizado sugiere que la metodología propuesta tiene el potencial de ser aplicada en sistemas contaminados más complejos, como aguas residuales y contaminantes emergentes. Es crucial priorizar acciones que aborden los desafíos de la investigación, como la adaptación de las fases magnéticas a diferentes condiciones de contaminación y la evaluación de su impacto a largo plazo en diferentes ecosistemas acuáticos. Se sugiere también la implementación de métodos

complementarios y el uso de técnicas avanzadas de análisis para profundizar en la comprensión de los mecanismos involucrados.

El proyecto sienta las bases para futuras investigaciones para el tratamiento de aguas residuales mediante procesos Foto-Fenton apoyados por fases magnéticas estables. Este enfoque tiene el potencial de ser una herramienta valiosa en la lucha contra la contaminación del agua, promoviendo así un medio ambiente más limpio y sostenible.

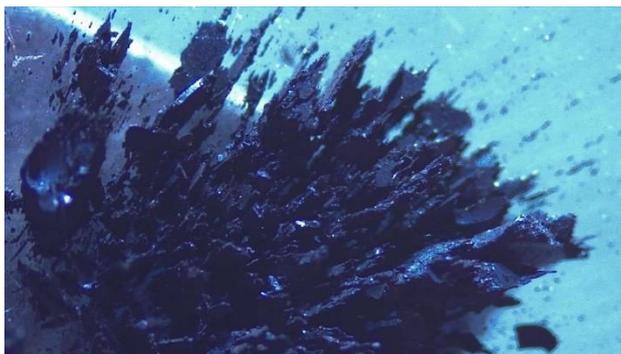
## 6 Referencias

1. Sandeep Singh, Gurpreet Singh, Niraj Bala. (2021). Synthesis and characterization of iron oxide-hydroxyapatite-chitosan composite coating and its biological assessment for biomedical applications, Progress in Organic Coatings, Volume 150, 106011, ISSN 0300-9440. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106011>.
2. Filiz Ay, Ebru Cokay Catalkaya, Fikret Kargi. (2009). A statistical experiment design approach for advanced oxidation of Direct Red azo-dye by photo-Fenton treatment. Journal of Hazardous Materials. Volume 162, Issue 1. Pages 230-236.
3. Dong, Y., Shi, Y., He, Y., Yang, S., Yu, S., Xiong, Z., Zhang, H., Yao, G., He, C., & Lai, B.. (2023). Synthesis of Fe-Mn-Based Materials and Their Applications in Advanced Oxidation Processes for Wastewater Decontamination: A Review. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01624>
4. Filiz Ay, Ebru Cokay Catalkaya, Fikret Kargi, A statistical experiment design approach for advanced oxidation of Direct Red azo-dye by photo-Fenton treatment, Journal of Hazardous Materials, Volume 162, Issue 1, 2009, Pages 230-236, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.027>.
5. V. Garzón-Cucaita, J. G. Carriazo, "Óxidos de hierro como catalizadores de procesos tipo Fenton con potencial aplicación en tecnologías de remoción de contaminantes," TecnoLógicas, vol. 25, nro. 55, e2393, 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2393>

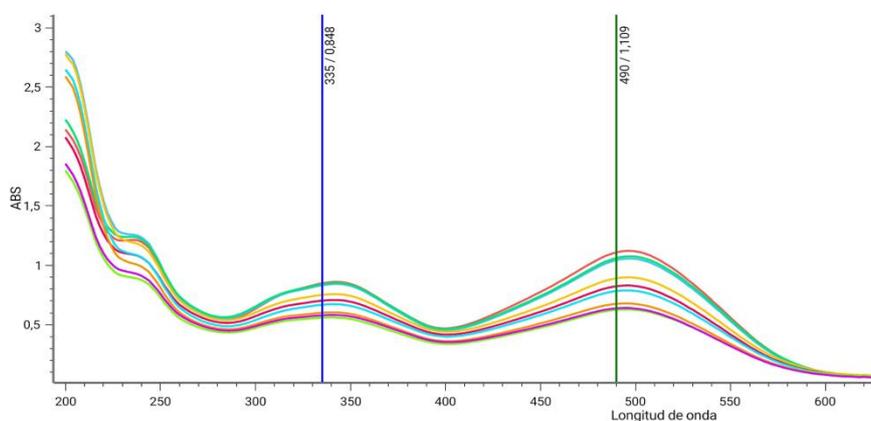


**Figura 1.** izq. Reacciones tipo Fenton; der. Ciclo catalítico del proceso foto-Fenton

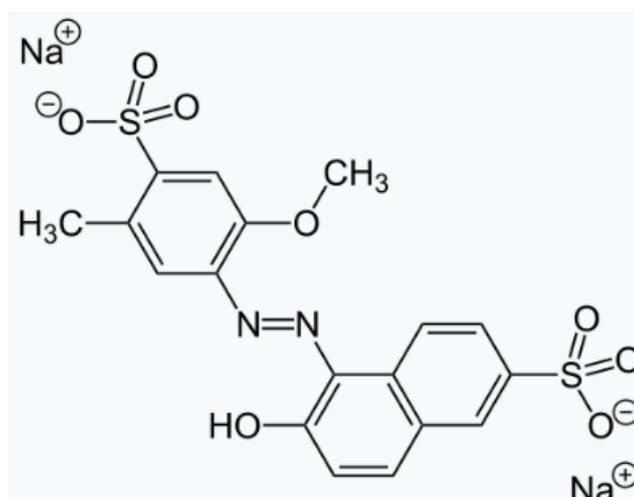
Fuentes. <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/2393/2636#figures> ; [https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Eschema-del-ciclo-catalitico-del-proceso-FotoFenton-21\\_fig2\\_345340576](https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Eschema-del-ciclo-catalitico-del-proceso-FotoFenton-21_fig2_345340576)



**Figura 2.** Observación del material con propiedades magnética sintetizado (magnetita). Fuente. Elaboración propia.

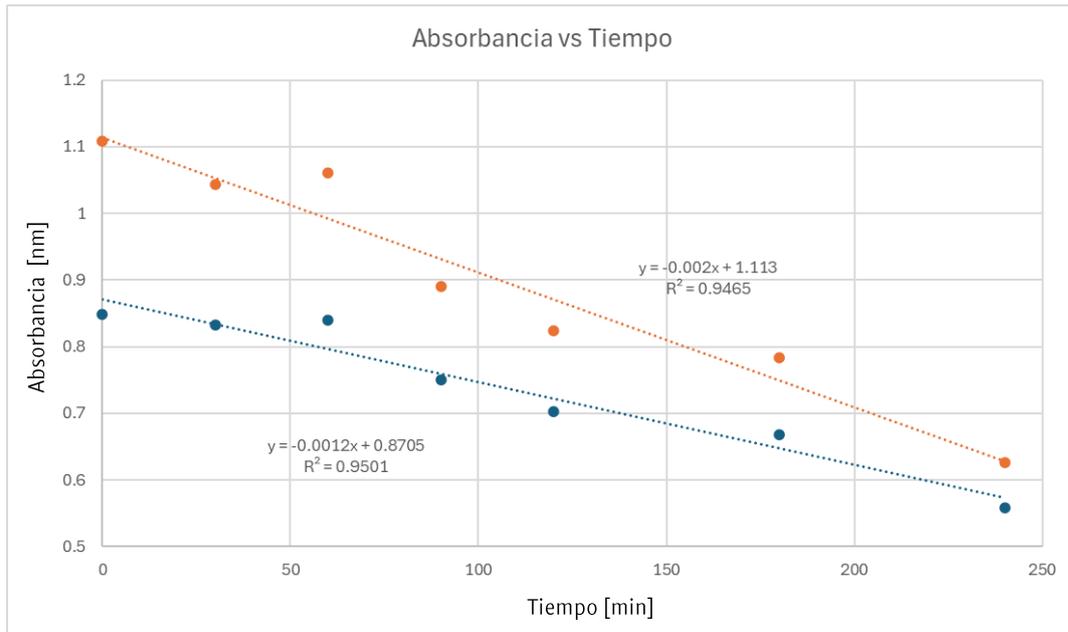


**Figura 3.** Espectros en función del tiempo de UV-Visible del colorante Rojo Directo 28 con una concentración inicial de 100 ppm, utilizando 30 mg de catalizador y 30  $\mu\text{L}$  de peróxido de hidrógeno. Fuente. Elaboración propia.



**Figura 4.** Estructura química del colorante Rojo Directo 28.

Fuente. [https://es.wikipedia.org/wiki/Rojo\\_allura\\_AC#/media/Archivo:Allura\\_Red\\_AC\\_Structural\\_Formula\\_V1.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Rojo_allura_AC#/media/Archivo:Allura_Red_AC_Structural_Formula_V1.svg)



**Figura 5.** Ajuste lineal del avance de la degradación del colorante Rojo Directo 28, a una concentración de 100 ppm, utilizando 30 mg de catalizador y 30  $\mu$ L de peróxido de hidrógeno. Fuente. Elaboración propia.