

## **Poderosos aliados contra la contaminación cromática: Explorando los procesos solares de oxidación avanzada en la degradación de colorantes de curtiduría**

Powerful allies against color pollution: Exploring advanced oxidation solar processes in the degradation of tannery dyes

Liliana Villasana-González, Elías López-Olvera, Martín Pacheco-Álvarez, Johan Cardenas-Ricardez, Darinka Najera-García, Sonia Herrera-Chávez, Yessica López-Durán, Juan M. Peralta-Hernández<sup>1</sup>  
juan.peralta@ugto.mx<sup>1</sup>

### **Resumen**

En este trabajo se llevó a cabo la aplicación de Procesos Electroquímicos de Oxidación Avanzada (POEA) en el tratamiento de aguas residuales de diferentes orígenes, particularmente de 3 colorantes (Violeta H (VH), Violeta S4B (VS4B) y Violeta SBL (VSBL)) usando dos electrolitos soporte, así como diferentes condiciones de operación en batch y en continuo.

**Palabras clave:** tratamiento de agua, colorantes, procesos de oxidación avanzada

### **Introducción**

El mundo de los textiles, colorido y vibrante ha sido una fuente constante de inspiración y creatividad para la industria de la moda y el diseño. Sin embargo, oculta tras la belleza de nuestras prendas y telas, se encuentra una preocupante realidad: la contaminación del agua causada por los colorantes textiles (Rodríguez-Narváez et al., 2021). Este problema ambiental, a menudo pasado por alto, tiene consecuencias devastadoras para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. En la búsqueda de soluciones efectivas para abordar esta contaminación, han surgido procesos de oxidación avanzada como la Electro-oxidación y la Electro-Fenton, presentándose como prometedoras alternativas (Pacheco-Álvarez et al., 2019; Peralta-Hernández et al., 2018; D. L. Villaseñor-Basulto et al., 2022). Estos procesos, basados en poderosas reacciones químicas, ofrecen la posibilidad de degradar y eliminar eficientemente los colorantes indeseables presentes en las aguas residuales de la industria textil.

En este artículo, explicamos el funcionamiento de algunos de estos procesos de oxidación avanzada y sus aplicaciones en la degradación de colorantes textiles, también, se muestran los resultados obtenidos en la eliminación de una mezcla equimolar de 3 colorantes (Violeta H (VH), Violeta S4B (VS4B) y Violeta SBL (VSBL)) denominada MVS, y por último se mencionan algunos beneficios que ofrecen estos procesos en términos de protección del medio ambiente y la salud pública.

Al trabajar con una mezcla de colorantes tratamos de reflejar escenarios del mundo real, ya que muchas corrientes de aguas residuales industriales contienen múltiples colorantes. Además, trabajar con mezclas de colorantes nos ayuda a optimizar las estrategias de tratamiento y garantizar una eliminación adecuada de todos los colorantes presentes. Este estudio también contribuye a la optimización de procesos y al cumplimiento normativo, al proporcionar datos para evaluar la calidad de los efluentes y desarrollar sistemas de tratamiento apropiados.

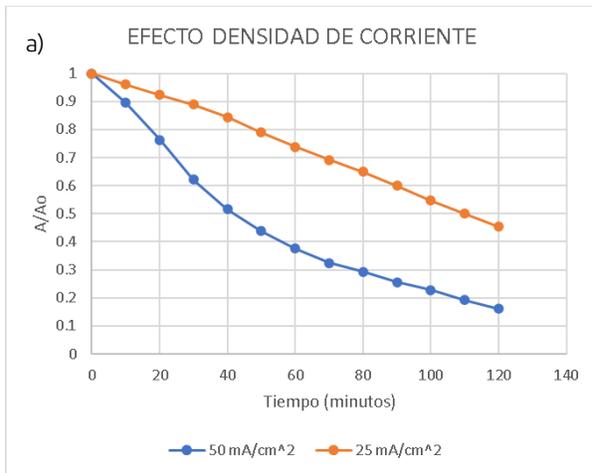
Debido a que la efectividad en la degradación de contaminantes en estos procesos de oxidación avanzada puede variar dependiendo de diversos factores, como la naturaleza del contaminante, y las condiciones de operación del proceso, entre ellas la densidad de corriente aplicada, tipo y concentración de electrolito soporte, volumen tratado, sistema electroquímico utilizado, entre otras, es de gran interés realizar el estudio de dichos factores en la degradación de MVS.

Otro factor de estudio importante en este tipo de procesos es el escalamiento, ya que ayuda a reducir los costos asociados con el tratamiento de aguas residuales textiles y promoverá la adopción generalizada de prácticas de producción más limpias en la industria. Esto asegurará un impacto positivo duradero en la protección del agua y la preservación del medio ambiente (D. Villaseñor-Basulto et al., 2021).

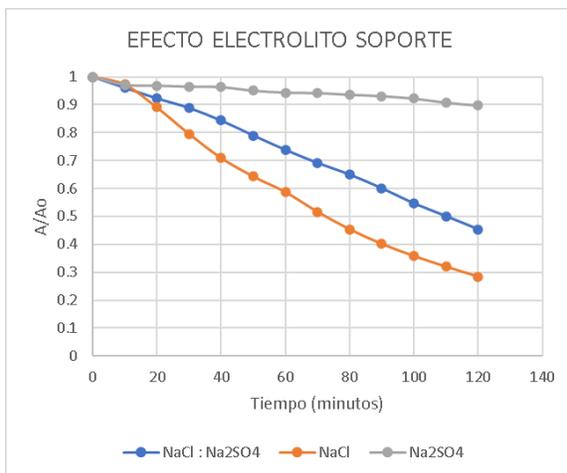
### **Electro-Oxidación (EO)**

La EO es un proceso en el que se utiliza un ánodo para generar especies oxidantes altamente reactivas, como el radical hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), capaces de degradar y descomponer los colorantes indeseables. Estas especies oxidantes atacan las moléculas de colorante, rompiendo sus enlaces químicos y convirtiéndolos en productos más simples y menos tóxicos. La EO ofrece ventajas significativas, como una alta eficiencia de degradación, una amplia gama de aplicaciones de colorantes tratados y la posibilidad de operar a temperatura ambiente.

En la Figura 1 se ilustra disminución de la concentración del contaminante en función del tiempo durante el proceso de EO para la degradación de MVS. Las curvas representadas muestran una disminución gradual y continua de la concentración del contaminante a medida que pasa el tiempo, con diferentes densidades de corriente aplicadas (a) y diferentes electrolitos soporte (b). Al paso del tiempo, se puede observar una disminución progresiva en la concentración del contaminante (Figura 2), lo que indica que el proceso es efectivo para degradar y eliminar los contaminantes presentes en el agua.



b)



**Figura 1.** Degradación de MVS 300 ppm, volumen 4 L, ph 3 a diferentes condiciones a) 17.5 mM NaCl + 17.5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> como electrolito soporte a diferentes densidades de corriente, b) 50 mA cm<sup>-2</sup> a diferentes electrolitos soporte.



**Figura 2.** Disminución de la concentración de MVS

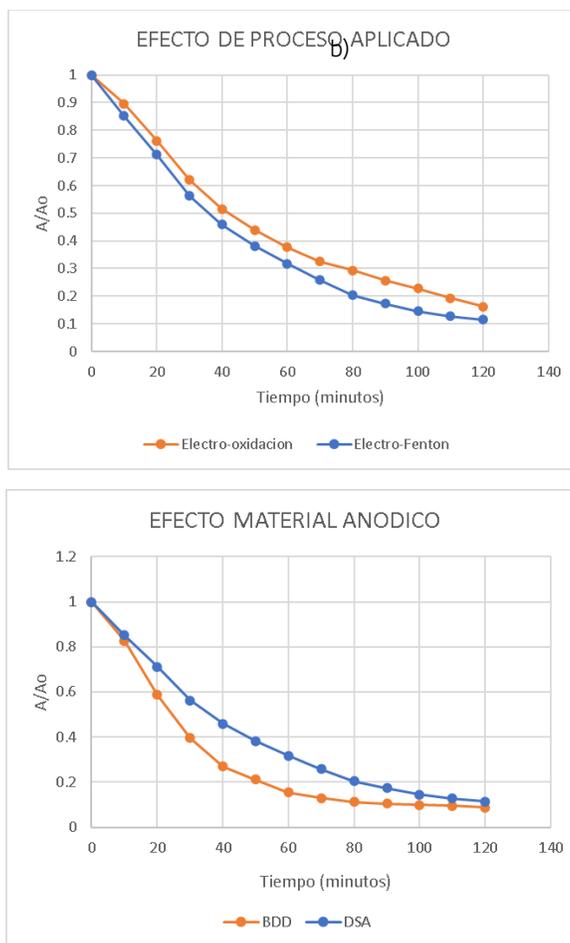
Estos gráficos respaldan la idea de que la electro-oxidación es una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales contaminadas, ya que

permite reducir significativamente la presencia de contaminantes y contribuir a la mejora de la calidad del agua tratada.

### **Electro-Fenton (EF)**

El proceso de EF utiliza la producción de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para generar  $\cdot\text{OH}$  a través de la reacción de Fenton, mediante la adición de un catalizador como  $\text{Fe}^{2+}$  a pH 3. El catalizador se regenera en la superficie del cátodo. En los medios con cloruro, se pueden generar aún más especies oxidantes, por lo que es importante evaluar su efecto en el proceso. Los  $\cdot\text{OH}$  atacan a los colorantes y otros compuestos orgánicos, rompiendo sus enlaces químicos y degradándolos en productos más simples y menos tóxicos. Este proceso de oxidación avanzada es altamente efectivo para la eliminación de colorantes, ya que los  $\cdot\text{OH}$  tienen una alta capacidad de reacción y pueden degradar una amplia gama de compuestos orgánicos. El proceso de EF ofrece varias ventajas, como una alta eficiencia de degradación, la posibilidad de operar en condiciones suaves de pH y temperatura, y la capacidad de regenerar el  $\text{Fe}^{2+}$  a través de la reducción del  $\text{Fe}^{3+}$  en el cátodo, permitiendo su reutilización.

a)



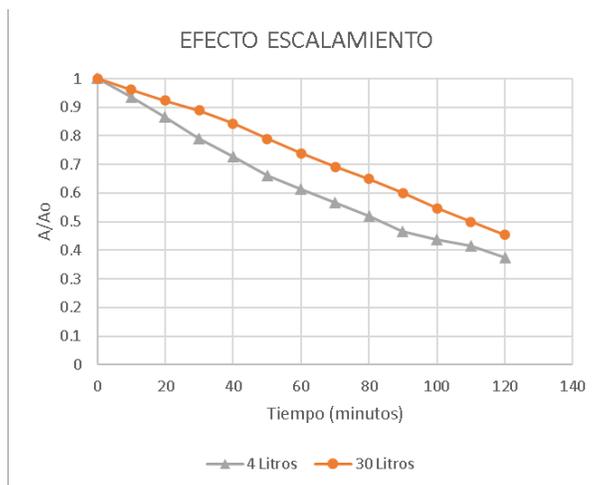
**Figura 3.** Degradación de MVS 300 ppm, con una densidad de corriente aplicada de  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ , ph 3, volumen 4 L, a) utilizando diferentes electrolitos soporte, b) EF utilizando diferente material anódico.

La Figura 3 muestra una comparación entre los procesos de EO y EF con diferentes el mejor electrolitos soporte y diferentes materiales anódicos, en el gráfico se puede observar una mayor disminución a un menor tiempo en el proceso de EF y con material anódico BDD.

### Escalamiento

El escalamiento de los procesos de oxidación avanzada en la degradación de colorantes textiles es de vital importancia para abordar eficazmente la contaminación cromática a gran escala. A medida que la industria textil continúa creciendo, es fundamental implementar soluciones aplicables a nivel industrial. El

escalamiento de estos procesos no solo permitirá tratar volúmenes significativos de aguas residuales contaminadas con colorantes, sino que también facilitará la implementación a gran escala de tecnologías más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.



**Figura 4.** Degradación de MVS 300 ppm, 17.5 mM NaCl + 17.5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con una densidad de corriente aplicada de 50 mA cm<sup>-2</sup>, ph 3.

La Figura 4 muestra la degradación de la mezcla MVS 300 ppm utilizando diferentes volúmenes en el proceso de oxidación avanzada.

## Conclusión

Los procesos de electro-oxidación y electro-Fenton se basan en la generación de especies oxidantes altamente reactivas, que son capaces de degradar y descomponer los colorantes, convirtiéndolos en compuestos más benignos.

Ambos métodos han demostrado una alta eficiencia en la eliminación de colorantes textiles, logrando altas tasas de degradación y eliminando la coloración del agua de manera efectiva.

El escalamiento de estos procesos implica adaptar las condiciones operativas y los parámetros del tratamiento a una escala industrial, lo que permite aplicar estas tecnologías a mayor escala y tratar volúmenes más grandes de agua

contaminada. Este paso es crucial para la viabilidad y aplicación práctica de estos métodos en la industria.

Los procesos de Electro-oxidación y Electro-Fenton, así como su escalamiento son herramientas valiosas en la eliminación de colorantes textiles en aguas contaminadas. Estas técnicas ofrecen ventajas como la eficiencia de degradación, la eliminación efectiva de la coloración y la posibilidad de escalar a nivel industrial. Con el desarrollo continuo de la tecnología y la colaboración entre investigadores, la aplicación práctica de estas técnicas podría convertirse en una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes textiles.

## Referencias

- [1] Pacheco-Álvarez, M. O. A., Picos, A., Pérez-Segura, T., & Peralta-Hernández, J. M. (2019). Proposal for highly efficient electrochemical discoloration and degradation of azo dyes with parallel arrangement electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 838. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.03.004>
- [2] Pacheco-álvarez, M. O., Rodríguez-Narváez, O. M., Wrobel, K., Navarro-Mendoza, R., Nava-Montes de Oca, J. L., & Peralta-Hernández, J. M. (2018). Improvement of the degradation of Methyl Orange Using a TiO<sub>2</sub>/BDD composite electrode to promote electrochemical and photoelectro-oxidation processes. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(12). <https://doi.org/10.20964/2018.12.70>
- [3] Peralta-Hernández, J. M., Vijay, S., Rodríguez-Narváez, O., & Pacheco-Álvarez, M. A. (2018). Photo and solar fenton processes for wastewater treatment. In *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00009-2>
- [4] Rodríguez-Narváez, O. M., Picos, A. R., Bravo-Yumi, N., Pacheco-Alvarez, M., Martínez-Huitle, C. A., & Peralta-Hernández, J. M. (2021). Electrochemical oxidation technology to treat textile wastewaters. *Current Opinion in Electrochemistry*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100806>
- [5] Villaseñor-Basulto, D. L., Picos-Benítez, A., Pacheco-Alvarez, M., Pérez, T., Bandala, E. R., & Peralta-Hernández, J. M. (2022). Tannery wastewater treatment using combined electrocoagulation and electro-Fenton processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107290>
- [6] Villaseñor-Basulto, D., Picos-Benítez, A., Bravo-Yumi, N., Perez-Segura, T., Bandala, E. R., & Peralta-Hernández, J. M. (2021). Electro-Fenton mineralization of diazo dye Black NT2 using a pre-pilot flow plant. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 895. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115492>