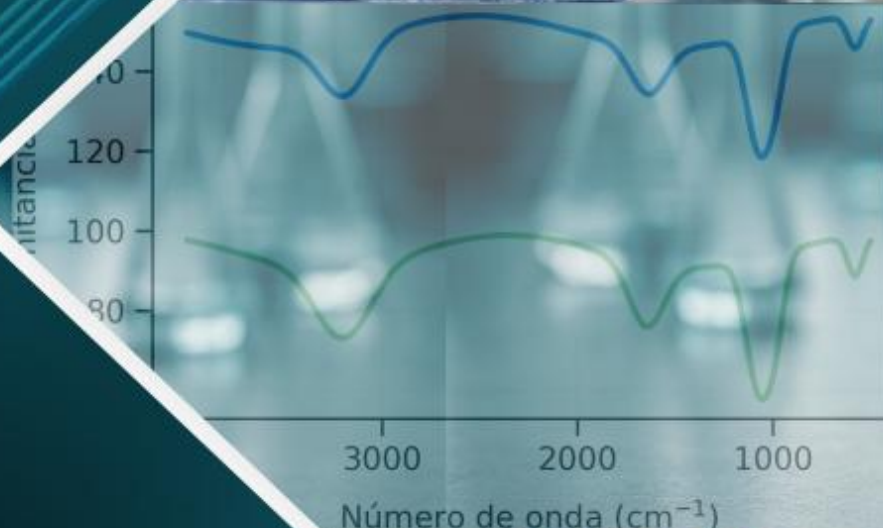


JEEOS

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

2026



Vol. 10 Núm. 1 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 01-2016-050908471400-203. ISSN: 2448-8186





DIRECTORIO

L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO
Rector

DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA
Secretario de Servicios Académicos

LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO
Encargado del Despacho de la Secretaría de
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.latinindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 1, Año 2026, es una publicación continua editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-050908471400-203, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de abril 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores
EDITORA EN JEFE

MSI. Alva del Rocío Pulido Téllez
GESTORA

M.A. Pauly González Mayo Dra. Antonia del Rocío López Guemez
ASISTENTE EDITORIAL Y MAQUETADO

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez
ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO

MC Sulma Guadalupe Gómez Jiménez MC Sirleni Ordóñez Frías
ASISTENTE DE TRADUCCION

EDITORES ASOCIADOS POR ÁREA

Dra. Angélica del Carmen Lizardo Pérez

M en C en Arq. Margarita del Carmen Noguera Miceli

Dra. Haydee Pérez Castro

Dr. Luis Manuel López Manrique

Dra. Karla María Aguilar Castro

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Dr. José de los Santos López Lázaro

Dra. Lizeth Rojas Blanco

Dr. Erik Ramírez Morales

M. C. Cristina Ponce Parra

Dr. Reymundo Ramírez Betancour

Dr. Emmanuel Munguía Balvanera

Dr. René Sebastián Mora Ortiz

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

Índice Vol. 10 Núm. 1 (2026)

Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición para caminos rurales de Tabasco	1-22
Solis-Cortazar D. ¹ , González-García E. ² , Solis-Cortazar JC. ¹ , Pérez-Castro H. ^{1*}	
Estrategia educativa: prototipo de microgasificador para el aprovechamiento de residuos sólidos y biomasa	23-30
Venegas-Sánchez J.A. ¹ , Muñoz-Barron B. ² , Jiménez-Hernández G. ¹	
Avances en el desarrollo en recubrimientos autorreparable	31-46
Domínguez-De Los Santos F.J. ¹ , Gómez-Álvarez F.J. ¹ , Rojas-Blanco L. ¹ , Escalante-Pérez M.E. ¹ , Ramírez-Morales E. ^{1*}	
Sustratos de oro en el desarrollo de biosensores para la seguridad alimentaria: avances y perspectivas	47-62
Sánchez-Rangel D.C. ¹ De León-Santillán A. ² , Barrera-Martínez C.L. ³ , Arredondo-Valdés R. ¹ , Laredo-Alcalá E.I. ^{1*}	
Valorización de residuos: $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ obtenido de alambre de neumáticos fuera de uso para el tratamiento fenton de agua con diclofenaco	63-74
González-Ybarra J. ¹ , Martínez-Sánchez C. ² , Alanís-Navarro J.A. ³ , Alarcón-Hernández F.B. ⁴ , Albarrán-Fuentes M.C. ⁴ , Morales-Hernández J. ⁵ , Sandoval-González A. ^{2*}	

Valorización de residuos: $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ obtenido de alambre de neumáticos fuera de uso para el tratamiento fenton de agua con diclofenaco**Waste valorization: $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ obtained from end-of-life tires wire for fenton treatment of water with diclofenac**

González-Ybarra J. ¹, Martínez-Sánchez C. ², Alanís-Navarro J.A. ³, Alarcón-Hernández F.B. ⁴, Albarrán-Fuentes M.C. ⁴, Morales-Hernández J. ⁵, Sandoval-González A. ^{2*}

¹Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso. Avenida Instituto Tecnológico s/n, Ejido, Tecnológico, 50640 San Felipe del Progreso, México.

²SECIHTI-Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. (CIDETEQ), Parque Tecnológico Querétaro, s/n, San Fandila, 76703, Pedro Escobedo, Querétaro.

³Laboratorio de Ecotecnologías (LabEc), Universidad Politécnica del Estado de Guerrero (UPEGro), Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

⁴Escuela de Estudios Superiores Xalostoc, s/n, Nicolas Bravo, Jaloxtoc, Morelos.

⁵Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. (CIDETEQ), Parque Tecnológico Querétaro, s/n, San Fandila, 76703, Pedro Escobedo, Querétaro.

*asandoval@cideteq.mx

Artículo Científico**Publicado: 30 de abril 2026****RESUMEN**

El tratamiento de aguas residuales ha cobrado relevancia, debido al aumento de contaminantes emergentes, difíciles de remover con métodos convencionales y esto representa un riesgo ambiental y sanitario. Paralelamente, la acumulación de neumáticos fuera de uso (NFU) requiere alternativas de valorización sustentables. Para este proyecto se sintetizó sulfato de hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) a partir de alambre de acero recuperado de NFU mediante disolución ácida.

La caracterización por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) demostró alta similitud estructural con sulfato de hierro heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) de grado reactivo. Se evaluó la eficiencia del proceso Fenton en la degradación de diclofenaco sódico utilizando la sal sintetizada y comercial como catalizadores, comparando relaciones estequiométricas $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ (1:1 y 1:3). Los resultados indicaron que el $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ sintetizado logró una mayor eficiencia de degradación (94.7%) con la relación 1:1, superando al reactivo comercial (92.8%). Estos resultados posicionan a la valorización de alambre de neumáticos como una alternativa efectiva y sustentable para la degradación de contaminantes orgánicos persistentes.

Palabras clave: Diclofenaco sódico; $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; Neumáticos fuera de uso; Proceso Fenton; Valorización de residuos.

ABSTRACT

Wastewater treatment has become increasingly important due to the rise in emerging contaminants that are difficult to remove using conventional methods, posing an environmental and health risk. Simultaneously, the accumulation of end-of-life tires (ELTs) requires sustainable valorization

alternatives. For this project, ferrous sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) was synthesized from steel wire recovered from ETLs using acid dissolution. Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) characterization demonstrated high structural similarity to reagent-grade ferrous sulfate heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). The efficiency of the Fenton process in the degradation of diclofenac sodium was evaluated using the synthesized and commercially available salts as catalysts, comparing stoichiometric $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ ratios (1:1 and 1:3). The results indicated that the synthesized $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ achieved a higher degradation efficiency (94.7%) with a 1:1 ratio, surpassing the commercial reagent (92.8%). These results position the valorization of tire wire as an effective and sustainable alternative for the degradation of persistent organic pollutants.

Keywords: Fenton process, Diclofenac sodium; End-of-life tires; Fenton Process; $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; Waste valorization.

INTRODUCCION

El crecimiento demográfico acelerado, la industrialización y el consumismo excesivo han incrementado la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), resultando en severos daños ambientales y riesgos para la salud humana [1]. Históricamente, el desarrollo industrial se centró en una producción lineal bajo el paradigma “comprar-tirar-comprar”, omitiendo la gestión del ciclo de vida post-consumo de los productos. Ante la falta inicial de marcos regulatorios sólidos, la acumulación de residuos es un problema crítico contemporáneo. Entre los residuos más voluminosos y persistentes destacan los neumáticos fuera de uso (NFU), los cuales presentan desafíos técnicos debido a su estructura termoestable, impidiendo su remoldeo tradicional [2,3]. Actualmente, se estima que existen 4,000 millones de neumáticos acumulados en vertederos y depósitos a nivel mundial [4]. La persistencia del transporte basado en vehículos automotores augura un incremento sostenido de este pasivo ambiental, lo que subraya la necesidad urgente de tecnologías de valorización. Por otro lado, la legislación formal sobre residuos neumáticos en México inicio con la promulgación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en 2003, la cual clasificó a los NFU como residuos de manejo especial, imponiendo la necesidad de gestión integral para evitar su abandono y quema a cielo abierto [5]. Sin embargo, la obligatoriedad operativa se consolidó con la publicación de la NOM-161-SEMARNAT-2011 el 1 de febrero de 2013, la cual obliga a productores, importadores, distribuidores y grandes generadores a establecer planes de manejo para la recuperación y valorización de NFU [6]. Posteriormente, en 2014, se reforzó el marco jurídico mediante un decreto que prohibió la disposición final de neumáticos en sitios no autorizados, como baldíos, barrancas, cuerpos de agua y redes de drenaje, vinculando a los actores de la cadena productiva con la responsabilidad compartida de su gestión. Pese a estos avances, el marco regulatorio contempla que el Ejecutivo Federal publique normas oficiales específicas para los criterios de gestión y valorización integral. Bajo este contexto legal y los principios de la economía circular, se han implementado estrategias de reutilización sostenible, destacando el co-procesamiento como combustible alterno en hornos cementeros y el aprovechamiento de material para la fabricación de

ladrillos [7-12]. La valorización del caucho proveniente de los NFU ha sido ampliamente abordada; sin embargo, el alambre de acero remanente constituye un residuo voluminoso que demanda alternativas de gestión sostenible bajo principios de economía circular. Si bien la literatura reporta la síntesis de materiales ricos en hierro a partir de este residuo, la mayoría de los estudios se limitan a la caracterización fisicoquímica de la sal obtenida ($\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) para compararlo con el reactivo grado analítico ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sin evaluar su desempeño funcional en procesos de oxidación avanzada [13,14]. Esta falta de aplicación práctica deja una brecha tecnológica en la valorización de residuos siderúrgicos de llantas. Ante este panorama, la presente investigación propone evaluar la eficiencia de remoción de diclofenaco sódico en agua mediante el proceso Fenton, utilizando como catalizador sulfato de hierro sintetizado a partir de alambre de NFU. Su rendimiento se comparará frente al sulfato de hierro comercial para establecer su viabilidad técnica. Se hipotetiza que el $\text{FeSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ sintetizado, al poseer fases de hierro similares, presenta propiedades catalíticas comparables o superiores al sulfato de hierro grado reactivo en la degradación de contaminantes emergentes, ofreciendo una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas.

Por otro lado, en los últimos años, los contaminantes farmacéuticos han adquirido importancia como contaminantes emergentes, capaces de afectar ecosistemas acuáticos y a la salud de los seres humanos. Uno de estos contaminantes altamente usado por los seres humanos a nivel mundial es el diclofenaco sódico, el cual es considerado un antiinflamatorio no esteroides (AINE), identificado de manera recurrente en aguas residuales, cuerpos superficiales y sedimentos debido a su resistencia ante los procesos convencionales de tratamiento de agua [15,16]. Esta problemática se ha convertido en un asunto de salud pública a nivel mundial. Por ello, la búsqueda de alternativas basadas en procesos de oxidación avanzada (POA) ha cobrado especial relevancia [17]. Entre estos, el proceso Fenton destaca como uno de los métodos más utilizados, debido a su alta eficiencia en la degradación de colorantes [18], la eliminación de fármacos [19] y la remoción de disruptores endocrinos, tales como el estradiol [20] y el fenol [21], entre otros contaminantes emergentes [22,23]. La reacción Fenton es la generación catalítica de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) los cuales son capaces de inactivar microorganismos patógenos y de romper estructuras moleculares complejas de fármacos, alcanzando eficiencias de remoción altas en periodos de tiempo cortos, mediante un ciclo catalítico entre el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el sulfato ferroso (Fe^{2+}) que actúa como catalizador homogéneo [24].

El proceso Fenton, descubierto en 1894 por H. Fenton, es un método de oxidación avanzada que se requiere equipos especiales ni altas temperaturas y presiones. Se caracteriza por operar en un medio ácido (pH 2-4) con un catalizador de hierro soluble y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como oxidante. La descomposición catalítica (ec. 1) del peróxido de hidrógeno mediante hierro (reacción Fenton) genera radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$, $E^\circ=2.80 \text{ V vs. ENH}$) altamente reactivos y no selectivos y otras especies reactivas del oxígeno (ROS), las cuales mineralizan eficazmente la materia orgánica, siguiendo las reacciones de la **Tabla 1**, descritas por Kumar y otros [25,26].

Tabla 1. Reacciones involucradas en la mineralización de la materia orgánica.

Reacción	k (M ⁻¹ . s ⁻¹)	Ec.
$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + \bullet OH$	63-70	(1)
$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + HO_2^* + H^+$	0.001-0.01	(2)
$Fe^{3+} + H_2O_2 \leftrightarrow Fe(OOH)^{2+} + H^+$	3.1×10^{-3}	(3)
$Fe(OOH)^{2+} \rightarrow Fe^{2+} + HO_2^*$	2.7×10^{-3}	(4)
$Fe^{3+} + HO_2^* \rightarrow Fe^{2+} + H^+ + O_2$	2.0×10^{-3}	(5)
$\bullet OH + RH \rightarrow H_2O + R^*$	10^7-10^9	(6)
$Fe^{2+} + \bullet OH \rightarrow Fe^{3+} + OH^-$	$(3.0-4.3) \times 10^8$	(7)
$Fe^{2+} + O_2^{\bullet-} (+2H^+) \rightarrow Fe^{3+} + H_2O_2$	1.0×10^7	(8)
$\bullet OH + \bullet OH \rightarrow H_2O_2$	$(4.2-5.3) \times 10^9$	(9)
$2HO_2^* \rightarrow H_2O_2 + O_2$	8.3×10^5	(10)
$\bullet OH + HO_2^* \rightarrow H_2O + O_2$	6.6×10^9	(11)
$\bullet OH + O_2^{\bullet-} \rightarrow OH^- + O_2$	1.0×10^{10}	(12)
$HO_2^* + O_2^{\bullet-} (+H^+) \rightarrow H_2O_2 + O_2$	9.7×10^7	(13)
$HO_2^* \rightarrow H^+ + O_2^{\bullet-}$	$(1.58-7.9) \times 10^7$	(14)
$H^+ + O_2^{\bullet-} \rightarrow HO_2^*$	1.0×10^{10}	(15)
$\bullet OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2^* + H_2O$	$(1.2-4.5) \times 10^7$	(16)
$HO_2^* + H_2O_2 \rightarrow \bullet OH + H_2O + O_2$	3.0	(17)
$O_2^{\bullet-} + H_2O_2 \rightarrow \bullet OH + OH^- + O_2$	0.13	(18)

Como muestra la Tabla 1, el mecanismo del proceso Fenton presenta una alta complejidad, siendo altamente dependiente del catalizador y las condiciones experimentales. La reacción clásica (ec. 1) genera el radical hidroxilo ($\bullet OH$) mediante la oxidación de Fe^{2+} . Un aspecto limitante es que la regeneración de iones ferrosos (ecuaciones 1 y 2) es más lenta ($0.001-0.01 M^{-1}s^{-1}$) que su oxidación inicial ($63-70 M^{-1}s^{-1}$), por lo que se requiere un suministro continuo de H_2O_2 para mantener el ciclo catalítico en presencia de Fe^{3+} . Si bien se generan otras ROS como el radical hidroperóxido (HO_2^* , $E^\circ = 1.70 V$ vs ENH), el anión superóxido ($O_2^{\bullet-}$) y los radicales peróxido ($R-OO^*$), cuya formación está ligada al pH, estas presentan una menor capacidad oxidativa. Finalmente, la principal limitación operativa radica en la generación de lodos de hidróxido férrico al alcalinizar el medio [27,28].

METODOLOGÍA

El alambre de acero inoxidable recuperado de las llantas fuera de uso se cortó en trozos pequeños con el fin de facilitar su manipulación y aumentar el área superficial de reacción. Para su limpieza, se empleó una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 98%, J.T. Baker) 5%V/V (1 mL por gramo de alambre), manteniendo la mezcla a 90 °C y 120 rpm durante 10 minutos. Tras enfriar a 50 °C, el alambre se sometió a tres lavados sucesivos con agua desionizada caliente (50 °C) para eliminar residuos. Posteriormente, se procedió a la síntesis de sulfato ferroso ($FeSO_4$) a 90 °C bajo agitación por 2 h, utilizando 6.5 mL de H_2SO_4 al 23% V/V por gramo de alambre. A la primera hora de reacción, se añadieron 50 mL de agua desionizada a 50 °C para compensar la evaporación y asegurar la inmersión del alambre. Al finalizar, la mezcla se enfrió (50–40 °C) y se filtró. Se añadió

un volumen equivalente de etanol al sobrenadante para inducir la cristalización del FeSO₄ durante 12 horas. Finalmente, los cristales obtenidos se filtraron y se colocaron en un desecador para eliminar el exceso de agua, para su posterior pesaje y caracterización [13]. Se utilizaron reactivos de grado analítico. Todos los experimentos se realizaron por triplicado. El material obtenido se analizó mediante FTIR (JASCO FTIR-4X) en un barrido de 4000 a 450 cm⁻¹, utilizando FeSO₄ grado reactivo como referencia comparativa.

Para los experimentos de degradación, se prepararon 200 mL de agua contaminada con 50 mg/L de diclofenaco sódico (C₁₄H₁₀Cl₂NNaO₂, Sigma Aldrich) ajustada a pH 6 (medido con un potenciómetro HANNA HI 2550). Como reactivo Fenton se empleó una disolución de FeSO₄ (J.T. Baker) 0.02 M a pH 3 y H₂O₂ al 30% (J.T. Baker). Se evaluaron relaciones estequiométricas Fe²⁺:H₂O₂ de 1:1 y 1:3. Las reacciones se llevaron a cabo con una agitación constante de 300 rpm durante un periodo de hasta 180 min. Se extrajeron alícuotas de 3 mL a intervalos definidos (1, 5, 10, 20, 30 y 60 min) para determinar la absorbancia mediante un espectrofotómetro UV-Vis (HACH DR 6000). Previamente, se realizó un barrido espectral (200-350 nm) identificando la longitud de onda de máxima absorción (λ_{max}) del diclofenaco sódico a 276 nm. Este procedimiento se aplicó uniformemente para evaluar tanto el material sintetizado como el de grado reactivo. Los experimentos se realizaron por triplicado. Asimismo, se intentó ajustar la cinética de degradación a un modelo de primer orden por ser simple y ampliamente utilizado en la degradación de fármacos. Sin embargo, dado que este modelo se ajusta mejor en las etapas finales y los datos experimentales no mostraron una buena concordancia, se aplicó el modelo de Behnajady-Modirshahla-Ghanbery (BMG). Este último ofrece un mejor ajuste en las etapas iniciales de degradación y es más preciso para modelar procesos complejos como el reactivo Fenton [24,25]. El modelo cinético BMG sigue la ecuación (19):

$$\frac{t}{\left[1 - \left(\frac{C_t}{C_0}\right)\right]} = m + bt \quad (19)$$

En donde: C₀ es la concentración inicial del contaminante (mg/L). C_t es la concentración en un tiempo t (min). m es el parámetro relacionado con la velocidad inicial de degradación y b es un parámetro asociado a la eficiencia del proceso conforme avanza la reacción. La cual describe la velocidad de degradación de contaminantes en los POA como Fenton, presenta una rápida oxidación al inicio y luego una etapa más lenta, lo cual depende de fenómenos como la disminución de radicales, la adsorción limitada o el consumo del oxidante (ecuación 1) [29].

RESULTADOS

La **Figura 1** muestra la comparación de los espectros IR del FeSO₄ grado reactivo y el FeSO₄ sintetizado a partir de alambre de neumáticos fuera de uso. Ambos espectros presentan gran similitud, lo que sugiere la formación exitosa del compuesto deseado. La banda ancha observada a ~3200 cm⁻¹ corresponde a la vibración de estiramiento O–H, confirmando la presencia de agua de

hidratación consistente con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. No obstante, el material sintetizado (línea roja) exhibe picos ligeramente más anchos o menos intensos, lo que podría atribuirse a un grado de hidratación variable, a un menor nivel de secado, o a la presencia de trazas de impurezas provenientes del alambre (caucho, Cu, Zn, Ni, C, etc.). La señal a $\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ confirma la deformación del enlace H–O–H, indicando la presencia del agua estructural, donde una ligera variación en la forma de la banda sugiere un entorno químico del agua levemente distinto entre ambas muestras.

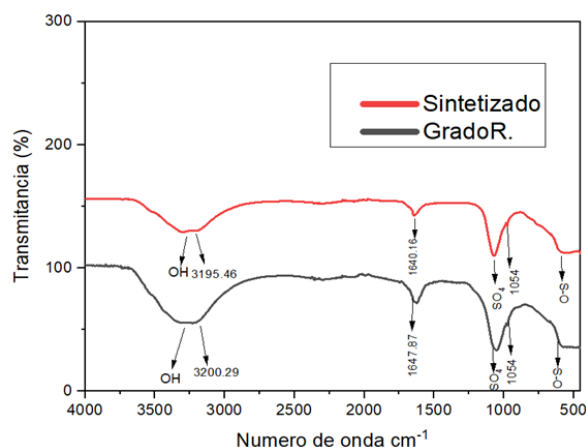


Figura 1 Espectro FTIR del FeSO_4 grado reactivo y FeSO_4 sintetizado a partir de alambre de neumáticos fuera de uso.

En la región del ion sulfato, se observó el estiramiento S–O característico a 1054 cm^{-1} , típico del sulfato heptahidratado, lo que ratifica la presencia de SO_4^{2-} . Asimismo, las bandas en la zona de 583 cm^{-1} , asignadas a los modos de flexión de SO_4^{2-} , refuerzan la similitud estructural y cristalina con la referencia. Las diferencias menores en la transmitancia se atribuyen a variaciones en el espesor de la muestra o ruido del equipo. En conclusión, la alta coincidencia en las bandas características (OH y SO_4^{2-}) confirma que el FeSO_4 sintetizado es químicamente equivalente al grado reactivo en su estructura principal, lo cual también fue confirmado por Lacalamita [30] y el grupo de trabajo de Amar-Gil [31].

La **Figura 2** muestra la degradación del diclofenaco sódico en función de la relación estequiométrica del reactivo Fenton ($\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$) para los distintos catalizadores evaluados, donde la máxima eficiencia se alcanzó a los cinco minutos de reacción. En la **Figura 2a**, se observa que la relación 1:1 obtuvo la mayor remoción (92.8%); no obstante, al triplicar la concentración de peróxido de hidrógeno (1:3), la degradación disminuyó un 10% (84.5%). Este descenso se atribuye al efecto secuestrador del exceso de H_2O_2 , el cual compite con el contaminante por los radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) o reacciona con el Fe^{2+} , formando especies de menos potencial de oxidación que ralentizan [32]. Si bien la velocidad de degradación suele incrementarse con la concentración de reactivos, una dosis excesiva de H_2O_2 y Fe^{2+} limita la eficiencia global al favorecer reacciones secundarias parasitarias (ver reacciones (10), (11), (16) y (17) de la tabla 1). Esto concuerda con otros estudios [33,34].

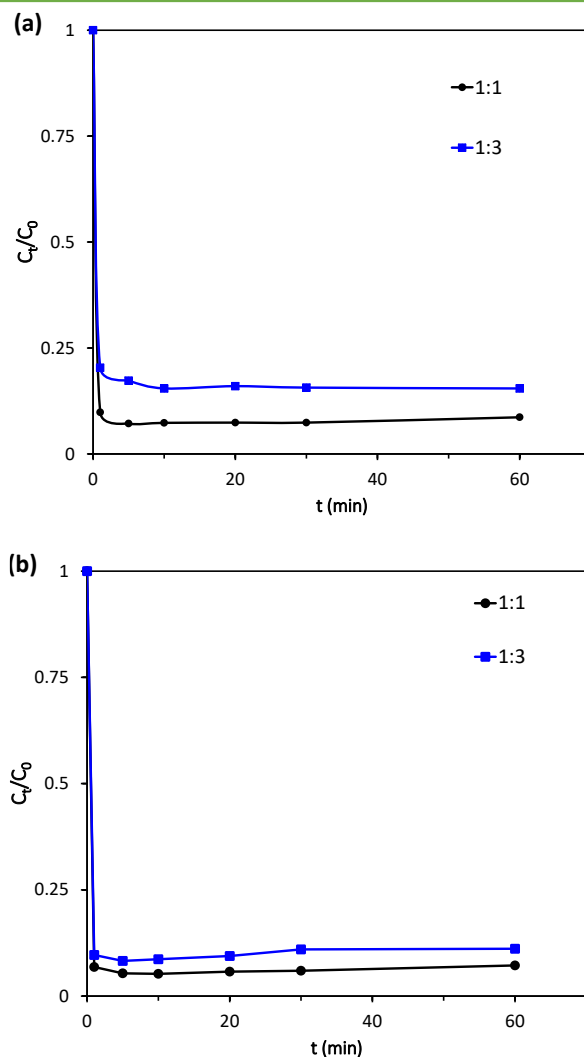


Figura 2 Remoción de diclofenaco sódico por el proceso Fenton a diferente estequiometría de $Fe^{2+}:H_2O_2$, utilizando (a) $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (línea negra) grado reactivo y (b) $FeSO_4 \cdot xH_2O$ (línea azul) catalizador sintetizado a partir del alambre de neumáticos fuera de uso.

Por otro lado, la **Figura 2b** demuestra que el catalizador $FeSO_4 \cdot xH_2O$ sintetizado superó el 94% de remoción en ambas relaciones estequiométricas, superando el desempeño del $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ grado reactivo. Este comportamiento superior podría asociarse a un menor contenido de agua de hidratación en la estructura del material sintetizado.

La **Tabla 2** presenta la cinética de degradación del diclofenaco sódico mediante el reactivo Fenton, comparando el uso de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ grado reactivo frente a $FeSO_4 \cdot xH_2O$ sintetizado a partir de los residuos de alambre de neumáticos fuera de uso. Los datos experimentales se ajustaron al modelo cinético BMG, dado que el modelo de primer orden arrojó coeficientes de correlación (R^2) inferiores a 0.3. En contraste, el modelo BMG mostró un ajuste excelente ($R^2 \approx 1$) en todos los casos. La constante de velocidad ($1/m$) fue superior utilizando el catalizador sintetizado, alcanzando 0.139 min^{-1} (relación 1:1) y 0.162 min^{-1} (relación 1:3), mientras que con $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ comercial fue de 0.074 min^{-1} , lo cual se atribuye a la competencia de reacciones previamente mencionada.

Tabla 2. Remoción de diclofenaco sódico por el proceso Fenton empleando catalizadores de FeSO₄.7H₂O comercial y FeSO₄.xH₂O sintetizado a partir del alambre recuperado de neumáticos fuera de uso.

Catalizador	Relación estequiométrica		Remoción (%)	Cinética de primer orden		Modelo cinético BMG		
	Fe ²⁺	H ₂ O ₂		k (min ⁻¹)	R ²	1/m (min ⁻¹)	1/b	R ²
FeSO ₄ Reactivo	1	1	92.8	0.016	0.129	0.114	1.093	0.999
	1	3	84.5	0.014	0.201	0.074	1.182	1.000
	1	1	94.7	0.015	0.096	0.139	1.077	0.999
Sintetizado	1	3	91.7	0.011	0.076	0.162	1.127	1.000

Respecto a la capacidad máxima de degradación, representada por el alto valor de 1/b, ambos materiales mostraron un comportamiento similar.

CONCLUSIONES

Los contaminantes emergentes son un problema debido a que los métodos de tratamiento convencionales han sido ineficientes en la eliminación de estos, siendo un peligro para la salud humana y los ecosistemas acuáticos. Con base en los resultados, se observó que la eficiencia del proceso Fenton en la degradación de diclofenaco sódico presente en el agua residual, utilizando FeSO₄.xH₂O sintetizado del alambre de los neumáticos fuera de uso y comparándolo con el FeSO₄.7H₂O comercial, permitió identificar que la relación 1:1 obtuvo la mayor eficiencia de con ambos tipos de hierro. Bajo estas condiciones, el FeSO₄.xH₂O sintetizado alcanzó un 94.7% de remoción, superando en 1.9% al reactivo comercial. Esto evidencia el alto potencial de valorización de residuos de hierro de los NFU como una fuente alternativa y sostenible para el proceso Fenton.

REFERENCIAS

- [1] Binnemans K., Jones P.T., Manjón-Fernández A., Masaguer-Torres V. (2020). Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from Steel Industry By-Products: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy* 6:505-540.
- [2] Han W., Han D., Chen H. (2023). Pyrolysis of Waste Tires: A review. *Polymers* 15:1604.
- [3] Martínez J.D. (2021). An overview of the end-of-life tires status in some Latin American countries: Proposing pyrolysis for a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144:111032.
- [4] Cummins, A. (2019). *Global ELT Management - A Global State of Knowledge on Regulation, Management Systems, Impacts of Recovery and Technologies*. Geneva: World Bus. Counc. *Sustain. Dev.* 1-57.
- [5] Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley->

- general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914, Página consultada el 30 de marzo de 2026.
- [6] NOM-161-SEMARNAT-2011 el 1 de febrero de 2013. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/134113/20.-NORMA_OFICIAL_MEXICANA_NOM-161-SEMARNAT-2011.pdf. Página consultada el 03 de abril de 2026.
- [7] Ortíz-Rodríguez O.O., Ocampo-Duque W., Duque-Salazar L.I. (2017). Environmental impact of end-of-life tires: life cycle assessment comparison of three scenarios from a case study in Valle del Cauca, Colombia. *Energies* 10:2117 doi:10.3390/en10122117.
- [8] Castañón A.M., Sanmiquel L., Bascompta M., Vega y de la Fuente A., Contreras V., Gómez-Fernández F. (2021). Used tires as fuel in clinker production: economic and environmental implications. *Sustainability* 13:10455.
- [9] Fiksel J., Bakshi B.R., Baral A., Guerra E., DeQuervain B. (2011). Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13:19–35.
- [10] Vasiliu L., Gencil O., Damian I., Harja M. (2023). Capitalization of tires waste as derived fuel for sustainable cement production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 56:103104.
- [11] Mohammed H.M., Raulf F.L., Basil S. A.-S., Mohammed D.H. (2025). Effect of firing temperature on clay bricks containing rubber tires wastes. *International Journal of GEOMATE* 29:56-66.
- [12] Goevert Dennis. (2024). The value of different recycling technologies for waste rubber tires in the circular economy-A review. *Frontiers in Sustainability* 4:1282805.
- [13] Amar Gil, S., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2024). Obtención y caracterización de sulfato de hierro (II) heptahidratado a partir de alambre de acero proveniente de llantas residuales. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 12:13–21.
- [14] Xu A., Liu W., Yang Z., Cao L., Sirés I., Zhang Q., Zhan. (2023). Waste tire upcycling for the efficient electrogeneration of H₂O₂ in advanced degradation of the antibiotic tinidazole by electro-Fenton process. *Journal of Cleaner Production* 430:139661.
- [15] Soria Ruiz, L.S., Chimbo, T. (2023). Efecto de los medicamentos antiinflamatorios no esteroideos (Aines) en la consolidación ósea. *Código Científico Revista de Investigación*, 4:32–49.
- [16] Lin, L., Yang, H., Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. In *Frontiers in Environmental Science*, 10:880246.
- [17] Gopalakrishnan, G.; Jeyakumar, R.B.; Somanathan, A. (2023). Challenges and Emerging Trends in Advanced Oxidation Technologies and Integration of Advanced Oxidation Processes with Biological Processes for Wastewater Treatment. *Sustainability* 15:4235.

- [18] Grisales C.M., Salazar L.M., Prato-Garcia D. (2019). Treatment of synthetic dye baths by Fenton processes: evaluation of their environmental footprint through life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research* 26:4300-4311.
- [19] Całus-Makowska K., Dziubińska J., Grosser A., Grobelak A. (2025). Application of the Fenton and photo-Fenton processes in pharmaceutical removal: New perspectives in environmental protection. *Desalination and Water Treatment* 321:100949.
- [20] Foteinis S., Borthwick A.G.L., Frontistis Z., Mantzavinas D., Chatzisyneon E. (2018). Environmental sustainability of light-driven processes for wastewater treatment applications. *Journal of Cleaner Production* 182:8-15.
- [21] Magdy M., Alalm M.G., El-Etriby H.K. (2021). Comparative life cycle assessment of five chemical methods for removal of phenol and its transformation products. *Journal of Cleaner Production* 291:125923.
- [22] Peres Ribeiro J., Sarinho L., Nunes M.I. (2024). Application of life cycle assessment to Fenton processes in wastewater treatment – A review. *Journal of Water Process Engineering* 57:104692.
- [23] Pimentel Prates M., Marcionílio S.M.O.L., Borges-Machado K., Medeiros de Araújo D., Martínez-Huitle C.A., Leão Arantes A.L. y Ferreira da Silva-Gadêlha J.E. (2023). Fenton: A Systematic Review of Its Application in Wastewater Treatment. *Processes*, 11:2466.
- [24] Berrones Bastar, X., Ortega Herrera, R.E., González-Chávez, R., Sandoval-González, A., Cárdenas-Mijangos, J., Martínez-Sánchez, C. (2025). Valorization of local FeSO₄ waste as a catalyst in a Fenton process for effective dye mixture decolorization. *International Journal of Environmental Science and Technology* 22:15733-15746.
- [25] Kumar J.E. Mulai T., Tripathy A. (2024). Behnajady-Modirshahla-Ghanbary kinetic model for degradation of azo dye using Fenton oxidation process: A mini review. *Next Research* 1:100047.
- [26] Behrouzeh M., Abbasi M., Osfouri S., Dianat M.J. (2020). Treatment of DMSO and DMAC wastewaters of various industries by employing Fenton process: Process performance and kinetics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8:103597.
- [27] Litter M.I., Slodowicz M., (2017). An overview on heterogeneous Fenton and photoFenton reactions using zerovalent iron materials. *Journal of Advanced Oxidation Technologies* 20160164.
- [28] Jain, B., Singh, A.K., Kim, H., Lichtfouse, E., Sharma, V.K. (2018). Treatment of organic pollutants by homogeneous and heterogeneous Fenton reaction processes. In *Environmental Chemistry Letters*, 16:947–967.
- [29] Ramos, M. D. N., Lima, J. P. P., Aguiar, A. (2024). Determination of Activation Energy from Decolorization Reactions of Synthetic Dyes by Fenton Processes Using the Behnajady–Modirshahla–Ghanbary Kinetic Model. *Catalysts* 14:273.
- [30] Lacalamita M, Ventruti G, Della Ventura G., Radica F., Mauro D., Schingaro E. (2021). In situ high-temperature x-ray powder diffraction and infrared spectroscopic study of melanterite, FeSO₄·7H₂O. *Minerals* 11:1–15.

- [31] Amar-Gil S., Ardila-Arias A.N., Barrera-Zapata R. (2023). Obtaining and characterization of catalytic materials from waste tires for the Fischer–Tropsch process. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 25:1325–1332.
- [32] Zeliger H.I. (2023). Chapter 18—Free radicals. In *Oxidative Stress*; Zeliger, H.I., Ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, pp. 211–226.
- [33] Cunha-Filho F.J.V., Silva D.N., Oller A., Chiavone-Filho O., Mota-Lima A. (2023). Stoichiometric excesses of H₂O₂ as dosimetry strategy: proof of concept for UVC-H₂O₂, dark-Fenton, and UVC-Fenton. *Environmental Science and Pollution Research* 30:14860–14872.
- [34] Nawaz S., Siddique M., Khan R., Riaz N., Waheed U., Shahzadi I., Asmat A. (2022). Ultrasound-Assisted Hydrogen Peroxide and Iron Sulfate Mediated Fenton Process as an Efficient Advanced Oxidation Process for the Removal of Congo Red Dye. *Polish Journal Environmental Studies* 31:2749-2761.

