



# Desarrollo y evaluación de materiales adsorbentes con celulosa y nanopartículas de Fe en la remoción de azul índigo: cinéticas e isotermas

N. A. Campos-Armas <sup>a\*</sup>, J. Ortiz- Espinoza <sup>b</sup>, L. A. Castillo- Suárez <sup>a</sup>, S. Ventura- Cruz <sup>a</sup>,  
M. J. Aguilar- Vega <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango, Santiago-La Marquesa 22, 52650 Santiago Tilapa, Estado de México, México.

<sup>b</sup> Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C, Calle 43 No. 130, Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida Yucatán, México.

## ABSTRACT

Composite materials with polysulfone (PSF), microcrystalline cellulose (CMC) extracted from sargassum, and iron nanoparticles (NPFe) at a ratio of 1:33 (additive: PSF of PSF-CMC, PSF-NPFe, PSF-CMC-NPFe, and PSF) were evaluated for the adsorption of indigo blue (AI) dye at an initial concentration of 50 mg/L. The materials were prepared with (TT) and without heat treatment (STT). The adsorption tests were carried out using 50 mL of solution adjusted to pH 6.0, with a stirring speed of 125 rpm, an adsorbent mass of 0.25 g, and a contact time of 210 min. The adsorption efficiency was evaluated using kinetic and isothermal models. The maximum adsorption capacity of the STT materials was 7.15, 6.75, 5.72, and 5.96 mg/g for PSF, PSF-CMC, PSF-NPFe, and PSF-CMC-NPFe STT, respectively, and 4.22, 6.14, 7.06, and 6.40 mg/g for TT, respectively. All materials exhibit pseudo-second-order adsorption kinetics. The Langmuir model fitted all materials adequately, indicating that the adsorption process was dominated by monolayer chemisorption.

## ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 20 Octubre, 2025

Revisado 05 Diciembre, 2025


Aceptado 30 Diciembre, 2025

## KEYWORDS

Composite material, Synthetic dyes, Adsorption, Heat treatment, Chemisorption.

## Introducción

La industria textil ocupa el tercer lugar en consumo de agua, el proceso de teñido y acabado requiere una cantidad considerable de agua. Estas aguas residuales pueden contener productos químicos ácidos/álcalis, lejías, tintes, ácido etilendiaminotetraacético, tensoactivos, agentes humectantes, jabones y metales pesados, que pueden tener un impacto negativo en los cuerpos de agua natural[1]. Las aguas residuales textiles procedentes del lavado de- mezclilla suelen contener elevadas concentraciones del colorante azul índigo (AI) (62 mg/L). Este colorante tiene una gran resistencia a la luz y es resistente a los rayos UV, se impide el

**AUTOR DE CORRESPONDENCIA** Nohemí Campos  [nohemi\\_24201003@test.edu.mx](mailto:nohemi_24201003@test.edu.mx)  Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango, Santiago-La Marquesa 22, 52650 Santiago Tilapa, Estado de México, México  
<https://doi.org/10.71103/x4bj4z20>

© 2026 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

paso de la luz solar, lo que impide la fotosíntesis y la liberación de oxígeno en las subcapas en lagos y lagunas. Este puede generar fenómenos de eutrofización, que pueden provocar la muerte de, reduciendo así la actividad fotosintética y la cantidad de oxígeno disuelto [2].

Diversos métodos de tratamiento han sido evaluados para la recuperación del agua textil. El método de adsorción es atractivo porque suele ser más económico y práctico de usar para eliminar compuestos orgánicos persistentes del agua debido a su alta eficiencia, menores requerimientos de energía y la capacidad de reciclar los materiales adsorbentes [3]. Los polímeros han sido ampliamente usados en procesos de separación y tratamiento de aguas desde finales del siglo XX, gracias a su versatilidad, resistencia química y facilidad de procesamiento [4]. La polisulfona (PSF) destaca por su elevada estabilidad térmica, alta resistencia mecánica y compatibilidad con diversas técnicas de modificación superficial [5]. En los últimos años, ha surgido un creciente interés en reforzar las matrices poliméricas con materiales naturales y funcionales, como la celulosa microcristalina (CMC), obtenida a partir de residuos vegetales o biomateriales. La CMC puede incrementar la capacidad de adsorción de los materiales y promueve el aprovechamiento de residuos orgánicos. Esta puede generar múltiples enlaces puente de hidrógeno, así como estructuras cristalinas, lo que ofrece estabilidad química a los materiales. Los colorantes pueden ser no iónicos (colorantes dispersos), catiónicos (colorantes básicos) y aniónico, lo que han permitido que su aplicación en la eliminación de colorantes sea un éxito. El sargazo, es una biomasa abundante en las costas del Caribe mexicano, representa una fuente renovable y económicamente viable para su obtención [6].

El uso de nanopartículas metálicas para la eliminación de colorantes en el agua ha minimizado el impacto peligroso y se ha considerado el mejor enfoque para la calidad del agua y la seguridad ambiental. Se evaluaron nanopartículas de óxido de circonio en la adsorción del colorante azul de metileno, obteniéndose una eliminación del 94% con una capacidad de adsorción de 23.3 mg/g, a pH 10, dosis de adsorbente de 0.3 g y una concentración inicial de colorante de 20 mg/L [7]. Los procesos de adsorción han sido utilizados exitosamente en la remoción de colorantes, sin embargo, nuevos materiales deben ser sintetizados por diferentes métodos y evaluados con la intención de generar una tecnología sustentable y amigable con el medio ambiente, con un proceso de regeneración accesible y eficiente, con pH de operación cercano al neutro, manera sustentable, eficiente y económica, usando metales más accesibles y que no representan un riesgo ambiental adicional.

El objetivo en esta investigación fue comparar el desempeño de biomateriales obtenidos a partir de una mezcla de PSF, CMC y NPFe con un tratamiento térmico (TT) y sin tratamiento térmico (STT), con el fin de evaluar la influencia de dicho proceso sobre la capacidad de adsorción del colorante azul índigo y las propiedades globales de la matriz compuesta por PSF, CMC y NPFe, evaluando las cinéticas e isotermas de adsorción en sistemas híbridos para comprender los mecanismos de interacción entre los contaminantes y la superficie activa del material.

## Metodología

### ***Caracterización mediante Espectroscopía Infrarroja (FTIR)***

Los materiales resultantes PFS, PSF-MCM, PSF-NPFe y PSF-MCM-NPFe se caracterizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un Affinity-1 S Shimadzu en el rango de números de onda de 4500-500  $\text{cm}^{-1}$  utilizando el método de reflexión total atenuada (ATR) antes y después de ser usados [8].

### ***Preparación de los materiales***

Las soluciones poliméricas se elaboraron mediante la disolución gradual de polisulfona (PSF) en N-metil-2-pirrolidona (NMP) a 70 °C bajo agitación constante. Se incorporaron CMC y NPFe a una relación masa 3 % con respecto a la cantidad de PSF, manteniendo la agitación durante 1 h, generando los materiales PSF, PSF-CMC, PSF-NPFe y PSF-CMC-NPFe. Las soluciones resultantes fueron sometidas a desgasificación por ultrasonido a 20 Hz, por 30 min en un volumen total de 8mL. Cada solución fue vertida en moldes circulares de aluminio y secada a 80 °C durante 48 horas para permitir la evaporación controlada del disolvente. Las formulaciones se dividieron en dos grupos: cuatro con tratamiento térmico (TT) y cuatro sin tratamiento térmico (STT). Las muestras correspondientes al grupo TT fueron sometidas a un proceso de secado adicional a 170 °C bajo presión de vacío de  $1 \times 10^{-3}$  Torr durante 48 h, con el objetivo de remover el solvente residual.

### Prueba de adsorción

Una solución de trabajo del colorante AI fue preparada a una concentración de 50 mg/L, por UV-vis a 300 nm de  $\lambda$  en un espectrofotómetro Velab VE-5600 empleando una mezcla de agua y etanol en proporciones 1:1 (v/v) como medio dispersante. La solución fue sonicada a 40 Hz por 3 min. En un volumen de 50 mL de solución se añadieron las películas adsorbentes de aproximadamente 0.25 cm<sup>2</sup>, a una velocidad de agitación de 125 rpm, a 25 °C y 6.0 pH. Se realizaron ensayos con películas sometidas a tratamiento térmico (TT) como sin tratamiento térmico (STT), con el propósito de comparar su eficiencia en la adsorción del colorante.

### Cinéticas e isotermas de adsorción

Los modelos cinéticos de pseudo primer orden (PPS), pseudo segundo orden (PSO), difusión intrapartícula y ley potencial se evaluaron en la remoción del colorante azul índigo debido a que estos modelos han demostrado un mayor ajuste en la adsorción de colorantes usando CMC y NPFe [9]. Las muestras fueron tomadas a los 5, 10, 15, 30, 60, 90 min. Los modelos ajustados fueron ec. (1), ec. (2), ec. (3) y ec. (4) usando el programa estadístico Statistica Soft:

Pseudo Primer orden:

$$qt = qe(1 - e^{-k_1t}) \quad (1)$$

Pseudo Segundo orden:

$$qt = \frac{qe^2k_2t}{1 + qek_2t} \quad (2)$$

Difusión intrapartícula:

$$qt = kpt^{0.5} + C \quad (3)$$

Ley potencial:

$$qt = k \cdot t^m \quad (4)$$

Donde  $q_t$  es la cantidad de adsorbato adsorbida en el adsorbente en el tiempo (mg/g),  $q_e$  es la cantidad de adsorbato adsorbida en el equilibrio (mg/g),  $k_1$  y  $k_2$  son las constantes de velocidad de adsorción de primer orden (1/min) y segundo orden (g/mg·min),  $k_p$  constante de la tasa de difusión intrapartícula (mg/g·min<sup>0.5</sup>),  $C$  es un parámetro relacionado con la resistencia al paso de la película o la capa límite externa (mg/g),  $k$  es la constante de velocidad (mg/g·min<sup>m</sup>), y  $m$  es el exponente de la ley de potencial, que indica la sensibilidad del sistema al tiempo de contacto. Los modelos Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich (D-R) (ec.5-10) fueron ajustados para calcular las constantes de adsorción usando el programa Statistica Soft aplicando métodos de iteración [10].

Langmuir:

$$qe = \frac{qmKLCe}{1 + KLCe} \quad (5)$$

Freundlich:

$$qe = K_F Ce \left( \frac{1}{n} \right) \quad (6)$$

Temkin:

$$qe = B \cdot \ln(A \cdot Ce) \quad (7)$$

Dubinin-Radushkevich (D-R):

$$qe = qm \cdot \exp(-K \cdot \varepsilon^2) \quad (8)$$

$$\varepsilon = RT \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{Ce} \right) \quad (9)$$

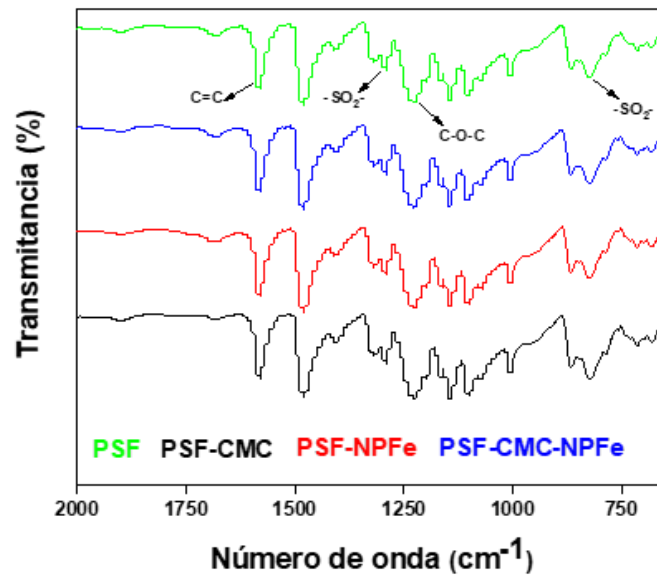
$$E = \frac{1}{\sqrt{2K}} \quad (10)$$

Donde  $q_e$  es la cantidad de adsorbato adsorbido por unidad de masa de adsorbente (mg/g),  $C_e$  es la concentración de adsorbato en solución en equilibrio (mg/L),  $q_m$  es capacidad máxima de adsorción (mg/L),  $K_F$  es la constante de Freundlich relacionada con la capacidad de adsorción,  $K_L$  es la constante de Langmuir (L/mg),  $n$  es la constante de heterogeneidad del sistema, para Temkin  $A$  es la constante de equilibrio de adsorción (L/g), mientras que  $B$  representa el efecto del calor de adsorción (J/mol),  $K$  es la constante de energía ( $\text{mol}^2/\text{kJ}^2$ ), y  $E$  es la energía media de adsorción (kJ/mol),  $\mathcal{E}$  es el potencial de Polanyi,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  corresponde a la constante universal de los gases, y  $T = 298.15 \text{ K}$  es la temperatura absoluta del sistema en el modelo D-R.

## Resultados y Discusión

### Caracterización de los materiales adsorbentes

La Figura 1 muestra los espectros correspondientes a los diferentes materiales obtenidos térmicamente. Todos los datos se normalizaron. En todas las muestras se observan las bandas características de la polisulfona, la vibración a  $1291 \text{ cm}^{-1}$  se atribuye al grupo sulfonilo ( $-\text{SO}_2-$ ), y esta presentes en todas las muestras. La banda en  $1580 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones del anillo aromático, mientras que la señal en  $1224 \text{ cm}^{-1}$  está relacionada con las vibraciones en los enlaces éter. Los materiales con CMC y NPFe pueden inducir desplazamientos en la región de  $1000\text{-}1300 \text{ cm}^{-1}$ , indicando posibles interacciones del grupo éter o del grupo sulfonilo con los sitios activos del aditivo. La presencia de Fe podría también generar nuevas bandas débiles asociadas a enlaces Fe-O o Fe-S, aunque su intensidad suele ser baja en el espectro IR debido a su carácter inorgánico (región de  $643\text{-}632 \text{ cm}^{-1}$ ) [11] En el caso del material PFS-CMC-NPFe, la combinación de ambos modificadores parece generar un patrón espectral ligeramente distinto, lo que podría asociarse a sinergias entre el carbono y el hierro en la superficie del material.



**Figura 1.** Espectro de infrarrojo de las muestras de material adsorbente PFS, PFS-CMC, PFS-NPFe, PSF-CMC-NPFe tratadas térmicamente (TT).

### Cinéticas de adsorción para azul índigo

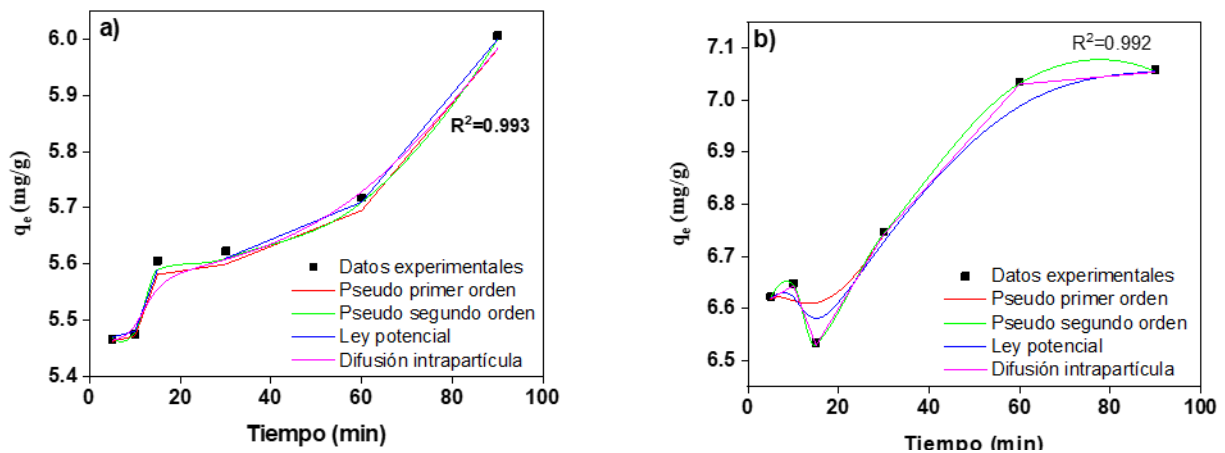
En la Tabla 1 se muestran las constantes cinéticas para todas las variantes de material, con y sin tratamiento térmico. Los datos experimentales en los materiales con y sin tratamiento térmico fueron descritos por el modelo de pseudo segundo orden, con coeficientes de correlación  $R^2$  superiores a 0.99 para todas las formulaciones. Este modelo, basado en un mecanismo de quimisorción, describió adecuadamente la evolución temporal del proceso en función de la disponibilidad de sitios activos en el material.

La similitud en el ajuste sugiere que el tratamiento térmico no modificó significativamente la cantidad ni la naturaleza de dichos sitios. El modelo permitió estimar con precisión parámetros como la capacidad de adsorción en equilibrio y la velocidad del proceso. Esta estabilidad evidencia que el mecanismo de adsorción se mantiene constante independientemente del tratamiento aplicado.

**Tabla 1.** Constantes cinéticas de los materiales evaluados en la remoción de Al sin y con tratamiento térmico.

Sin Tratamiento Térmico												
Material	Pseudo primer orden			Pseudo segundo orden			Difusión intrapartícula			Ley potencial		
	$q_e$ (mg/g)	$k_1$ (1/min)	$R^2$	$q_e$ (mg/g)	$k_2$ (mg/g·min)	$R^2$	$k_p$ (mg/g·min <sup>0.5</sup> )	C (mg/g)	$R^2$	k (mg/g·min <sup>m</sup> )	m exp	$R^2$
PSF	7.218	0.0224	0.983	7.217	0.0052	<b>0.997</b>	0.58	6.12	0.942	6.63	0.12	0.978
PSF-CMC	6.754	0.0198	0.978	6.753	0.0053	<b>0.995</b>	0.52	6.01	0.936	6.82	0.10	0.972
PSF-NPFe	6.006	0.0176	0.974	6.006	<b>0.0058</b>	<b>0.993</b>	0.45	5.89	0.928	5.52	0.08	0.965
PSF-CMC-NPFe	5.956	0.0184	0.975	5.956	0.0056	<b>0.994</b>	0.47	5.91	0.931	5.94	0.09	0.969
Con Tratamiento Térmico												
PSF	7.154	0.0210	0.981	7.153	0.0051	<b>0.996</b>	0.41	2.65	0.943	0.79	0.14	0.956
PSF-CMC	6.648	0.0189	0.976	6.752	0.0052	<b>0.994</b>	0.40	5.89	0.939	1.88	0.11	0.962
PSF-NPFe	5.598	0.0170	0.972	5.723	<b>0.0057</b>	<b>0.992</b>	0.38	6.62	0.931	2.19	0.09	0.968
PSF-CMC-NPFe	5.849	0.0178	0.974	5.961	0.0054	<b>0.993</b>	0.39	6.36	0.935	2.04	0.10	0.961

La Figura 2 a-b presentan las curvas correspondientes al material PSF-NPFe con y sin tratamiento térmico, los cuales registraron los mayores valores de constante de velocidad 0.0057 y 0.0058 (mg/g·min), respectivamente según el modelo de pseudo segundo orden. Esta representación se consideró característica del sistema, ya que mostró el mejor ajuste y refleja la tendencia general observada en los demás materiales analizados, una rápida captación inicial del colorante seguida por una etapa de equilibrio más lenta y estable. Garba et al. [12] demostraron que el carbón activado ha mostrado alta eficiencia en la remoción de colorantes, su ventaja se relaciona con la gran área superficial, alta porosidad, durabilidad y estabilidad. Membranas sintetizadas usando acetato de celulosa evaluadas en la remoción de herbicidas mejoraron su eficiencia al incrementar la superficie disponible de 16.81 m<sup>2</sup>/g a 291.68 m<sup>2</sup>/g, la mayor porosidad disponible aumenta el potencial de adsorción [13]. Un incremento en el área superficial específica mejora las eficiencias, y ha sido una estrategia ampliamente para eliminar tintes y metales pesados del agua [14].



**Figura 2.** Ajuste de los modelos cinéticos aplicados al sistema PSF-NPFe. **a)** Materiales sin tratamiento térmico (STT). **b)** Materiales con tratamiento térmico (TT).

### Isotermas de adsorción para azul índigo

En la Tabla 2 se muestran las constantes de isotermas para todas las variantes de material, con y sin tratamiento térmico. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en la capacidad de adsorción y eficiencia de remoción entre las formulaciones con y sin tratamiento térmico. Las formulaciones sin tratamiento térmico, como PSF, mostraron el mejor desempeño 7.15 mg/g, 70.07% de remoción del colorante (Figura. 3a), atribuible a una superficie más polar con grupos funcionales activos favorecida por la presencia de NMP, sin embargo, esto puede significar, inestabilidad química del material, puede genera lixiviación del NMP al contacto con agua, provocando una disolución parcial del material, generando una menor vida útil que evite su recuperación y aplicación en varios ciclos de operación [15] la variante PSF-CMC (6.75 mg/g, 65.79%) presentó una ligera disminución, atribuida a la incorporación de celulosa, cuyos grupos hidroxilo (-OH) generaron interacciones competitivas que limitaron el acceso a los sitios activos.

PSF-NPFe y PSF-CMC-NPFe, conteniendo NMP en su estructura, mostraron eficiencias inferiores a 6 mg/g en capacidad de adsorción y menores al 60% en porcentaje de remoción, lo que indicó que las nanopartículas podrían impedir la activación superficial en las formulaciones sin tratamiento térmico. Estos resultados (pH 6, 250 mg de adsorbente, 210 min de contacto), contrastaron con lo reportado por Zanotti et al. [16], quienes alcanzaron 62.5 mg/g y 92.3% de remoción con solo 20 mg de adsorbente a pH 4.5. No obstante, PSF mostró un rendimiento competitivo sin necesidad de funcionalización química, lo que evidenció ventajas en términos de escalabilidad y simplicidad de síntesis a un pH cercano a la neutralidad.

Las muestras PSF-NPFe y PSF-CMC-NPFe alcanzaron capacidades de adsorción de 7.06 y 6.40 mg/g, respectivamente, superando hasta en 1.6 veces a PSF-CMC y PSF sin tratamiento térmico (Figura 3b). Las nanopartículas podrían favorecer la activación superficial al aumentar el área específica y aportar sitios activos adicionales. De manera similar, el estudio de Al-Hazmi et al. [17] reportó que las nanopartículas de  $Y_2O_3$  mejoran el desempeño de membranas de polietersulfona, aunque enfocadas en procesos de permeación. En ambos estudios, la incorporación de nanopartículas modifica la microestructura y potencia la eficiencia del sistema.

Sin Tratamiento Térmico													
Material	Temkin			Dubinin-Radushkevich				Langmuir			Freundlich		
	A	B	R <sup>2</sup>	q <sub>m</sub>	K	E	R <sup>2</sup>	q <sub>max</sub>	K <sub>L</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub>	1/n	R <sup>2</sup>
	(L/g)	(J/mol)		(mg/g)	(mol <sup>2</sup> /kJ <sup>2</sup> )	(kJ/mol)		(mg/g)	(L/mg)		(mg/g)		
PSF	2.31	0.85	0.948	7.25	0.0011	21.3	0.931	7.15 <sup>a</sup>	0.013	<b>0.998</b>	6.99	0.3125	0.997
PSF-CMC	2.15	0.81	0.942	6.88	0.0010	20.7	0.926	6.75 <sup>b</sup>	0.012	<b>0.997</b>	6.66	0.3257	0.996
PSF-NPFe	1.98	0.76	0.935	6.12	0.0009	19.8	0.918	5.72 <sup>d</sup>	0.011	<b>0.996</b>	5.72	0.3401	0.994
PSF-CMC-NPFe	2.05	0.79	0.939	6.45	0.0010	20.2	0.922	5.96 <sup>c</sup>	0.012	<b>0.997</b>	6.03	0.3322	0.995
Con Tratamiento Térmico													
PSF	2.26	0.83	0.946	7.12	0.0012	21.5	0.943	4.22 <sup>d</sup>	0.0128	<b>0.998</b>	3.951	0.3518	0.996
PSF-CMC	2.10	0.79	0.940	6.87	0.0010	20.6	0.938	6.14 <sup>c</sup>	0.0142	<b>0.997</b>	5.872	0.3221	0.995
PSF-NPFe	1.93	0.74	0.933	7.05	0.0009	20.0	0.931	7.06 <sup>a</sup>	0.0153	<b>0.998</b>	6.812	0.3060	0.997
PSF-CMC-NPFe	2.01	0.77	0.934	6.41	0.0010	20.3	0.934	6.40 <sup>b</sup>	0.0139	<b>0.997</b>	6.103	0.3207	0.996

## Conclusiones

El análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier sugiere que la presencia de Fe podría inducir la aparición de nuevas bandas débiles asociadas a enlaces Fe-O o Fe-S. En el caso del material PSF-CMC-NFe, la combinación de ambos aditivos genera un patrón espectral ligeramente distinto, atribuible a efectos combinados entre el carbono y el hierro en la superficie del material. En todos los materiales, la cinética de adsorción se ajustó al modelo de pseudo segundo orden, indicando un mecanismo de quimisorción. Además, el modelo de Langmuir mostró un buen ajuste, sugiriendo una adsorción monocapa sobre sitios activos homogéneos. Por otro lado, los materiales PSF y PSF-CMC sin tratamiento térmico presentan las mayores eficiencias de adsorción, asociadas a una superficie más polar con grupos funcionales activos promovidos por la presencia de NMP. No obstante, esta condición puede comprometer la estabilidad química del material debido a la posible lixiviación del NMP en contacto con agua. En contraste, los materiales PSF-NFe y PSF-CMC-NFe tratados térmicamente ofrecen eficiencias competitivas, junto con una mayor estabilidad estructural y térmica. La incorporación de nanopartículas incrementa el área superficial y el número de sitios activos, lo que favorece su desempeño en aplicaciones sostenibles y reutilizables.

## Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento otorgado por el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) a través del proyecto C-SINERGIA-FICDTEM-25-027, destinado a la ejecución de las pruebas experimentales y al programa Becas COMECYT Modalidad Posgrado, Estudios de Maestría por la beca 2024BPC2-M0336

## Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación.

## Referencias

- [1] Islam MT, Al Mamun MdA, Halim AFMF, Peila R, Sanchez Ramirez DO. Current trends in textile wastewater treatment—bibliometric review. *Environmental Science and Pollution Research* 2024;31:19166–84. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32454-3>.
- [2] Nahar N, Haque MdS, Haque SE. Groundwater conservation, and recycling and reuse of textile wastewater in a denim industry of Bangladesh. *Water Resour Ind* 2024;31:100249. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100249>.
- [3] Manzar MS, Aziz HA, Meili L, Dias MC, de Sá ÍMGL, Palaniandy P, et al. Adsorption of Tetracycline onto MgFe-LDH/Cellulose Nanocrystals Structured Composite. *Water Air Soil Pollut* 2023;234:291. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06297-6>.
- [4] Shukla BK, Parashar B, Patel T, Gupta Y, Verma S, Singh S. Polymeric Membranes in Water Treatment: Insights into Contaminant Removal Mechanisms and Advanced Processes. *ASEC 2024*, Basel Switzerland: MDPI; 2025, p. 69. <https://doi.org/10.3390/engproc2025087069>.
- [5] Casetta J, Pochat-Bohatier C, Cornu D, Bechelany M, Miele P. Enhancing Water Treatment Performance of Porous Polysulfone Hollow Fiber Membranes through Atomic Layer Deposition. *Molecules* 2023;28:6133. <https://doi.org/10.3390/molecules28166133>.
- [6] Ma M, Chen Y, Zhao X, Tan F, Wang Y, Cao Y, et al. Effective removal of cation dyes from aqueous solution using robust cellulose sponge. *Journal of Saudi Chemical Society* 2020;24:915–24. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.09.008>.
- [7] Alagarsamy A, Chandrasekaran S, Manikandan A. Green synthesis and characterization studies of biogenic zirconium oxide (ZrO<sub>2</sub>) nanoparticles for adsorptive removal of methylene blue dye. *J Mol Struct* 2022;1247:131275. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131275>.
- [8] García-Orozco VM, Roa-Morales G, Linares-Hernández I, Serrano-Jimenes IJ, Salgado-Catarino MA, Natividad R. Electrocoagulation of a chocolate industry wastewater in a Downflow column electrochemical reactor. *Journal of Water Process Engineering* 2021;42:102057. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102057>.

- [9] Revellame ED, Fortela DL, Sharp W, Hernandez R, Zappi ME. Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Clean Eng Technol* 2020;1:100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>.
- [10] Chen X. Modeling of Experimental Adsorption Isotherm Data. *Information* 2015;6:14–22. <https://doi.org/10.3390/info6010014>.
- [11] Castillo-Suárez LA, Linares-Hernández I, Martínez-Miranda V, Garduño-Pineda L, Castañeda-Juárez M, Teutli-Sequeira EA. Denim industry wastewater treatment by a heterogeneous solar-Fenton process catalyzed by Fe supported on recycled polyethylene terephthalate (PET) by ultrasonic modification. *J Environ Manage* 2024;351:119929. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119929>.
- [12] Garba ZN, Lawan I, Zhou W, Zhang M, Wang L, Yuan Z. Microcrystalline cellulose (MCC) based materials as emerging adsorbents for the removal of dyes and heavy metals – A review. *Science of The Total Environment* 2020;717:135070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135070>.
- [13] Sharma K, Choudhary P, Majeed A, Guleria S, Kumar M, Rana AK, et al. Cellulose based membranes, hydrogels and aerogels for water treatment application. *Ind Crops Prod* 2025;225:120474. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120474>.
- [14] Ma C, Yi L, Yang J, Tao J, Li J. Nanocellulose–organic montmorillonite nanocomposite adsorbent for diuron removal from aqueous solution: optimization using response surface methodology. *RSC Adv* 2020;10:30734–45. <https://doi.org/10.1039/D0RA04853D>.
- [15] Yousaf MU, Madeo Cortarelli L, Jebet NI, Unrine JM, Aich N, Tsyusko O V., et al. Characterization, Performance, and Toxicological Assessment of Polysulfone-Sulfonated Polyether Ether Ketone Membranes for Water Separation Applications. *Membranes (Basel)* 2025;15:87. <https://doi.org/10.3390/membranes15030087>.
- [16] Zanotti A, Baldino L, Cardea S, Reverchon E. Methyl Orange Adsorption Using Chitosan-Based Composite Aerogels Produced by Supercritical Gel Drying. *Polysaccharides* 2025;6:1. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6010001>.
- [17] Lazăr AL, Cîrciumaru A, Istrate GG, Dănăilă E, Baltă Ștefan. The Influence of Y2O3 Nanoparticles on the Permeation Properties of Polyethersulfone Membranes. *Separations* 2025;12:272. <https://doi.org/10.3390/sep12100272>.