

Elaboración de membranas a partir de poliestireno reciclado utilizando dimetil isosorbida como disolvente verde para tratamiento de agua

Stephania Santana-Luna, Marcial Yam-Cervantes, Rita Sulub-Sulub, Maria Ortencia González-Díaz*

^{a)} Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Mérida Yucatán, 97200, México; ^{b)} Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. [*maria.gonzalez@cicy.mx](mailto:maria.gonzalez@cicy.mx)

Resumen: El reciclaje de poliestireno expandido (PSE), un residuo plástico de difícil valorización, ofrece una alternativa sostenible para el desarrollo de materiales de separación. En este trabajo se elaboraron membranas planas asimétricas a partir de PSE y PSE sulfonado (3% y 5%) obtenido de material de embalaje reciclado. Las membranas se fabricaron mediante inversión de fase (NIPS) utilizando dimetil isosorbida (DMI) como disolvente verde y empleando la mezcla 2-propanol/ácido acético (80/20 v/v) como baño de coagulación. La sulfonación mejoró notablemente la hidrofiliidad (ángulo de contacto reducido de 89° a 67°), el antiensuciamiento y la recuperación de flujo (%RF), sin comprometer la resistencia mecánica. Además, las membranas sulfonadas mostraron mayor rechazo del colorante reactivo negro 5 (RB5) y una estructura más porosa, lo que incrementó la permeabilidad sin pérdida significativa de selectividad. En conjunto, los resultados confirman que el PSE reciclado permite desarrollar membranas eficientes para el tratamiento de aguas, con potencial en tecnologías de separación sostenibles y en la valorización de residuos plásticos.

Introducción.

Según datos reportados por la ONU, la industria textil es responsable del 20% del agua contaminada a nivel mundial, ya que se requieren 7500 litros de agua, y se liberan al ambiente hasta 200.000 toneladas de pigmentos y colorantes al año, si el agua no es eficientemente tratada [1]. Por esta razón, resulta cada vez más crucial implementar soluciones que faciliten la reutilización de las aguas residuales. El uso de membranas es una de las tecnologías que más aceptación e innovación ha tenido en los últimos años en el tratamiento de agua. Por otro lado, actualmente, millones de toneladas de plástico son desechados anualmente en todo el mundo, la mayoría de ellos son tirados en vertederos o incinerados. Estos residuos contribuyen significativamente a la contaminación plástica a nivel mundial. En México se generan diariamente 102,895 toneladas de residuos, 83.93% en sitios de disposición final, con una tasa de reciclabilidad baja (9.63%) [2]. Se ha identificado que el polietileno de baja densidad, el polipropileno y el poliestireno son los plásticos que más contribuyen,

siendo el poliestireno el de menor potencial de reciclaje. En particular, el poliestireno expandido (PSE) se usa ampliamente en envases desechables de un solo uso y materiales de embalaje. Recientemente, los residuos plásticos de PSE de un solo uso han sido considerados un material potencial para la economía circular [3,4]. Dentro de este contexto, se propone el desarrollo de membranas asimétricas usando residuos plásticos de poliestireno expandido (PSE) y para su aplicación en la eliminación de colorantes.

Parte experimental.

Materiales. El PSE se obtuvo de residuos de material de embalaje. Goma xantana, colorante negro 5, clorosulfonato de trimetilsililo (CISTMS, 99%), 1,2-dicloroetano (DCA %), dimetil isosorbida (DMI), ácido acético (AC 99%), y 2-propanol (99.5%) se usaron como se recibieron.

Sulfonación a 3 y 5%: En un matraz de 250 mL se disolvieron 10 g de PSE en 80 mL de dicloroetano bajo atmósfera de nitrógeno. Posteriormente, se agregó a goteo el agente

sulfonante (CISTMS) previamente disuelto en 7 mL de dicloroetano. Al terminar el goteo se dejó reaccionar la solución por 6 h. La mezcla se precipitó en alcohol etílico. Las fibras poliméricas se recuperaron y secaron en una estufa por vacío a 60°C por 24 h. En la siguiente Tabla 3, se resumen las cantidades de reactivos y disolventes empleados.

Tabla 1. Concentraciones para la sulfonación de PSE

Grado de sulfonación	Agente sulfonante (ml)	Disolvente (ml)
5%	0.7	7
3%	0.4	4

Elaboración de las membranas: Se elaboraron por el método de inversión de fases. Se prepararon disoluciones poliméricas al 22% p/v utilizando dimetil isorbobida (DMI) como disolvente. Se disolvió 1 g de polímero en DMI por 12 h. La solución polimérica homogénea se vertió en una base de vidrio y se realizó el razado de la película usando una cuchilla previamente graduada a un espesor de 33 µm. Inmediatamente, se colocó en un baño de coagulación de 2-propanol/ácido acético hasta su formación (ver Figura 1). Una vez formadas, las membranas se colocaron en un baño de agua destilada hasta su uso y caracterización.



Figura 1. Elaboración de membrana.

Desempeño de las membranas:

Prueba de antiensuciamiento: se realizó en una celda de alta presión Sterlitech HP4750 con agitación (Ver Figura 2).



Figura 2. Esquema de prueba de antiensuciamiento

Se utilizó una solución de 1000 ppm de goma xantana. Se colocó en la celda una membrana con un diámetro de 5 cm, y se compacto con agua destilada por 1 h. Una vez compactada se midió la permeación de agua durante 2 h para determinar el flujo inicial (J_{w1}). Se retiró el agua y se colocaron 200 mL de la solución de goma xantana en un tiempo de 17 h, este flujo se reportó como (J_{w2}). Posteriormente, se enjuagó la membrana con agua, y finalmente se agregó agua y se midió el flujo final (J_{w3}) durante 2 h. Las pruebas se realizaron a dos presiones diferentes, a 5 bar (70 ±5 Psi) y a 9 bar (140±10 Psi). Cada flujo (J_{wi}) se determinó usando la ecuación (1).

$$J = \frac{V}{At} \quad (1)$$

Donde **V** es el volumen de la membrana, **A** es el área efectiva de la membrana y **t** es el tiempo de permeación (h).

Para evaluar el porcentaje de recuperación de flujo (%RF) se utilizó la siguiente ecuación (2)

$$(\%)RF = \frac{J_{w3}}{J_{w1}} \times 100 \quad (2)$$

Prueba de eliminación de colorantes: Se llevó a cabo de manera similar a la prueba de antiensuciamiento. Una vez compactada la membrana se agregó una solución de colorante negro 5 de 50 ppm, la cual fue permeada a través de la membrana. Se cuantificó la absorbancia de la muestra inicial y del permeado en un espectroscopio UV-Vis (Biotek Cytation™ 3), a una longitud de onda de 595 nm.

Resultados y discusión.

La elaboración de membranas asimétricas utilizando DMI como disolvente es una estrategia innovadora que combina propiedades sostenibles, funcionales y ambientales.

Las imágenes SEM de las membranas PSE, PSE-3 y PSE-5, mostraron superficies densas, como puede observarse en la Figura 3 (A, D y G), así como una cara inferior con poros escasos y dispersos. En la sección transversal de las membranas se observa una estructura porosa uniforme, con una ligera disminución del tamaño de los poros a medida que aumenta el grado de sulfonación.

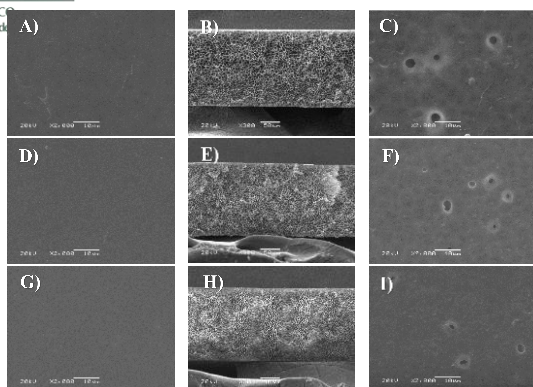


Figura 3. Micrografías de membranas PSE, (A, B, C) vista superficial, transversal y cara inferior. PSE-3 (D, E y F) y PSE-5 (G, H e I)

La Figura 4 muestra los espectros FTIR de PSE, PSE-3 y PSE-5 donde se observan las siguientes señales: entre 2800 y 3100 cm^{-1} las bandas correspondientes a los enlaces C-H, los enlaces C=C aparece en la banda de 1500-1600 cm^{-1} . Con la sulfonación del poliestireno (PSE -3 y PSE-5), aparecen nuevas bandas a 1127 y 1181 cm^{-1} , atribuidas a las vibraciones asimétricas y simétricas del grupo sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$).

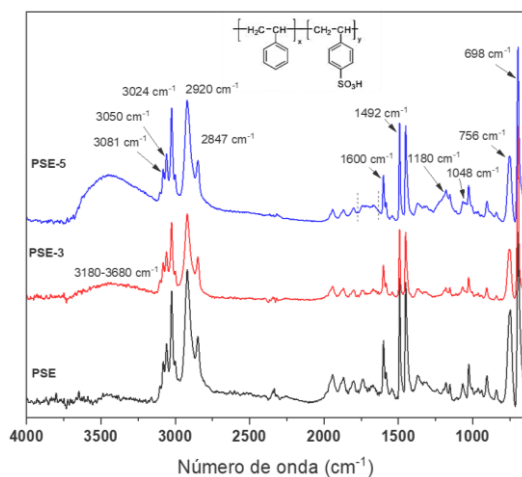


Figura 4. FTIR de PSE, PSE-3 y PSE-5

La Figura 5 presenta los resultados obtenidos en las pruebas de ángulo de contacto para las membranas PSE, PSE-3 y PSE-5. El ángulo de contacto promedio para el PSE fue de 89°, mientras que PSE-3 y PSE-5 presentaron valores de ángulo de contacto de 77.5° y 67°, respectivamente, lo cual indica que conforme aumenta el grado de sulfonación en las

membranas su hidrofiliidad también va aumentando. Esto se atribuyó a la presencia de los grupos sulfónicos, los cuales incrementan la hidrofiliidad de la membrana, reduciendo el ángulo de contacto [5].

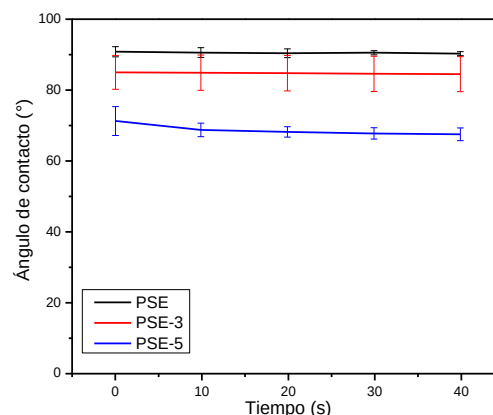


Figura 5. Ángulo de contacto de agua PSE, PSE-3 y PSE-5.

Las pruebas de antiensuciamiento a 5 bar indican que el porcentaje de recuperación de flujo (%FR) aumenta con el grado de sulfonación de las membranas, el cual aumentó progresivamente con valores de 26.1 %, 33.5 % y 40.7 % para PSE, PSE-3 y PSE-5, respectivamente. Este comportamiento se atribuye al aumento de la hidrofiliidad de las membranas con mayores niveles de sulfonación (ver Tabla 2). La incorporación de grupos $-\text{SO}_3\text{H}$ favorecen la afinidad por el agua, lo que reduce la acumulación de contaminantes en la superficie y mejora la capacidad de recuperación del flujo durante el reciclado.

Tabla 2. Flujos de recuperación (FR) de las membranas de PSE en DMI a 5 y 9 bar

Membranas	FR a 5 bar (%)	FR a 9 bar (%)
PSE	22.6±0.01	32.3±0.02
PSE-3	33.5±0.01	44.3±0.13
PSE-5	40.7±0.11	58.2±0.11

Los porcentajes FR también mostraron una mejora significativa a 9 bar, evidenciando una mayor resistencia al ensuciamiento. Se registraron valores de %RF de 38 % para PSE, 44 % para PSE-3 y 58 % para PSE-5, lo

que confirma una tendencia positiva con el incremento del grado de sulfonación.

Desempeño en la eliminación de colorante

El desempeño en separación en las membranas de PSE y PSE sulfonado se evaluó utilizando el colorante negro reactivo 5. La capacidad de rechazo de colorantes de las membranas (Figura 6) a 5 bar siguió el orden PSE-5 (97 %) > PSE-3 (96 %) > PSE (94 %), mostrando una tendencia coherente con la disminución del tamaño de poro. Por otro lado, al aumentar la presión se observó una disminución en la eficiencia de retención de RB5 para todas las membranas.

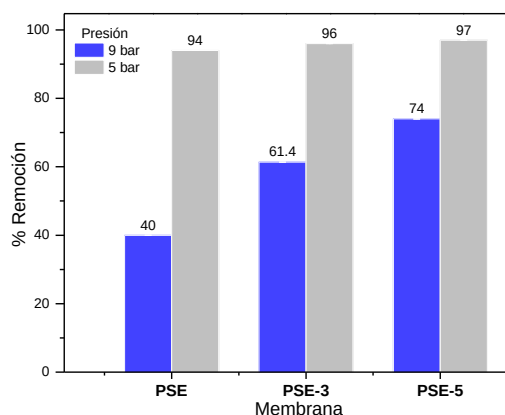


Figura 6. Gráfico comparativo de membranas de PSE y PSE sulfonado.

A presiones más altas, la estructura de la membrana puede comprimirse ligeramente, reduciendo el tamaño efectivo de los poros. En particular, la membrana PSE exhibió una caída en su porcentaje de eliminación de 94% a 40%, mientras que para la membrana PSE-3 disminuyó de 96% a 61% y en cuanto a la membrana de PSE-5 de 97% a 74%. A pesar de esta disminución se observó que las membranas sulfonadas logran tener mayor porcentaje de eliminación que PSE para ambas presiones (5 y 9 bar).

Conclusiones.

La sulfonación de residuos de poliestireno expandido (PSE) permitió el desarrollo de membranas poliméricas para la eliminación de colorantes. El incremento en el grado de sulfonación se correlacionó directamente con un aumento en la hidrofiliidad, la permeabilidad y la capacidad de recuperación

de flujo (%RF), lo que sugiere una mayor resistencia al ensuciamiento.

En pruebas de retención del colorante negro reactivo 5, las membranas sulfonadas presentaron una mayor eficiencia de rechazo frente al PSE no sulfonado, tanto a presiones bajas (5 bar) como altas (9 bar), confirmando que la sulfonación mejora las interacciones electrostáticas y la capacidad de separación. En general, este enfoque no solo ofrece una solución funcional para la reutilización de residuos plásticos, sino que también contribuye al desarrollo de tecnologías sostenibles dentro de una economía circular.

Agradecimientos.

A la Secretaria de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (SECIHTI), por el financiamiento a través del proyecto ciencia de frontera CF-2023-I-670

Referencias.

- 1) "Programa Nacional Contra la Sequía Monitoreo de la Sequía | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx" [cited 2025 Feb 11].
- 2) "Residuos Sólidos Urbanos (RSU) | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx" [cited 2025 Feb 18].
- 3) Tran ATK, Pham TT, Nguyen QH, Hoang NTT, Bui DT, Nguyen MT, et al. "From waste disposal to valuable material: Sulfonating polystyrene waste for heavy metal removal". J Environ Chem Eng. 2020; (5); 104-302.
- 4) 8. Nguyen HD, Oh H, Hoang NHM, Jo WH, Kim MS. "Environmental science and pollution research role of heavy metal concentrations and vitamin intake from food in depression: a national cross-sectional study". Environ Sci Pollut Res Int. 2022; (3); 4574-86.
- 5) Paddison SJ. "Proton Conduction Mechanisms at Low Degrees of Hydration in Sulfonic Acid-Based Polymer Electrolyte Membranes". Annu Rev Mater Res. 2003; (13); 289-319.