

Influencia del disolvente en la elaboración de una membrana polimérica de inclusión (PIM)

Influence of the solvent in the preparation of a polymeric inclusion membrane (PIM)

J. Marcial-Gutiérrez^a, M. E. Páez-Hernández^{id}^a, C. A. Galán-Vidal^{id}^a, I. S. Ibarra^{id}^a, I. Pérez-Silva^{id}^{a,*}

^a Área Académica de Química, Ciudad del Conocimiento, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Resumen

En el siguiente trabajo se evaluó la influencia que presenta el cambio de disolvente empleado en la formación de una membrana polimérica de inclusión (PIM) sobre su morfología y propiedades mecánicas. Los componentes de la PIM empleados fueron: poliestireno expandido recuperado (Pst) como soporte polimérico, aliquat 336 como agente extractante y 2-nitrofeniloxiléter como plastificante. Las membranas elaboradas fueron caracterizadas mediante ángulo de contacto, porosidad, microscopía electrónica de barrido y la extracción en batch del ácido acetilsalicílico presente en una solución acuosa observándose que es posible eliminarlo hasta en un 83.90%. Todo esto permite ver que la membrana desarrollada puede ser utilizada para el tratamiento de contaminantes emergentes y la disminución de plásticos de un solo uso.

Palabras Clave: membrana polimérica de inclusión, disolventes, morfología, poliestireno.

Abstract

In this work, the influence of the change of solvents used in the elaboration of polymer inclusion membrane (PIM) on their morphology and mechanical properties was evaluated. The PIM components were expanded polystyrene (Pst), as a support polymer, aliquat 336 carriers and 2-nitrophenyloxyether as a plasticizer. The membranes were characterized by contact angle, porosity, scattering electronic microscopy, and the extraction in batch of the salicylic acid present in aqueous solution removal to 83.90%. According to this, membrane development can be used for the treatment of emergent pollutants and the reduction of single-used polymeric materials.

Keywords: polymer inclusion membrane, solvent, morphology, polystyrene.

1. Introducción

La tecnología de membranas ha tenido un gran desarrollo debido a su sostenibilidad, selectividad, bajo costo de aplicación, amigable con el medio ambiente, de fácil acceso y versatilidad. Esta versatilidad ha permitido combinarlas con dos o más procesos de membranas o diferentes como la coagulación o absorción (Obotey y Rathilal, 2020). Debido a esto, han tenido innumerables aplicaciones tales como hemodiálisis, desalinización, filtración, procesos alimenticios, tratamiento de agua entre otras (Nunes *et al.*, 2020).

De acuerdo con sus usos y componentes las membranas pueden clasificarse por su origen, transporte y estructura dentro de las cuales se encuentran las membranas líquidas (Martínez, 1999). Este tipo de membranas fueron utilizadas

por primera vez para la separación de hidrocarburos en 1986 (Noble, 1987); se pueden definir como aquellas que tienen un agente extractante disuelto en la membrana lo cual permite la extracción y recuperación en un solo paso empleando pequeñas cantidades de solventes orgánicos; su principal desventaja es su baja estabilidad por lo que se han desarrollado diversos tipos como las membranas poliméricas de inclusión (Zuo *et al.*, 2021).

Las membranas poliméricas de inclusión (PIM) son películas delgadas, flexibles y estables compuestas por un agente extractante, un plastificante y el soporte polimérico (Keskin *et al.*, 2021). Inicialmente se emplearon para la construcción de electrodos selectivos de iones y sensores químicos ópticos; debido a su versatilidad y estabilidad es que fueron

*Autor para la correspondencia: iperez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: iperez@uaeh.edu.mx (Irma Pérez-Silva), ma359503@uaeh.edu.mx (Jessica Marcial-Gutiérrez), oaczh@uaeh.edu.mx (María Elena Páez-Hernández), galanv@uaeh.edu.mx (Carlos Andrés Galán-Vidal), Israel_ibarra@uaeh.edu.mx (Israel S. Ibarra).

Historial del manuscrito: recibido el 17/04/2024, última versión-revisada recibida el 13/06/2024, aceptado el 26/06/2024, en línea (postprint) desde el 10/07/2024, publicado el 05/01/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i24.12773>



empleadas como métodos de separación para la eliminación sencilla, selectiva y ecológica de diversos compuestos tóxicos presentes en diversos tipos de efluentes de una manera ecológica en distintas aplicaciones tal y como se muestra en la Tabla 1. (Jha *et al.*, 2020).

En la Tabla 1, se puede observar que parte fundamental para el desarrollo de las PIM es la elección de cada uno de sus componentes. Por ejemplo, el agente extractante al ser el encargado de proporcionarle selectividad a la membrana debe de ser elegido acorde al analito de interés. Existen diferentes tipos de agentes extractantes: básicos, neutros, solvatantes, ácidos, macrocíclicos y iónicos (Jha *et al.*, 2020). También se han empleado líquidos iónicos como el aliquat 336 los cuales tienen una insignificante presión de vapor, alta conductividad iónica y estabilidad electroquímica y que al ser una sal cuaternaria de amonio pueden ser empleado tanto como extractantes como plastificante (Piotr *et al.*, 2021).

Los plastificantes son compuestos generalmente orgánicos con una cadena alquílica hidrofóbica o bien diversos grupos polares altamente solvatantes. Son empleados para proporcionarle suavidad y flexibilidad a la PIM al igual que le proporciona estabilidad química y mecánica y aumenta el flujo de los analitos a través de ella. Lo anterior es posible gracias a que penetra entre las cadenas poliméricas y neutraliza sus grupos polares o bien incrementa la distancia entre las moléculas del polímero de tal forma que disminuye la fuerza intermolecular que existe entre ellas. La elección de estos plastificantes se realiza principalmente por su disponibilidad comercial y bajo costo empleándose principalmente el 2-Nitrofenil octiléter (NPOE) y el 2-Nitrofenil pentiléter (NPPE) (Nghiem *et al.*, 2006).

Por otro lado, el soporte polimérico es el encargado de proporcionarle resistencia mecánica a las membranas. Los termoplásticos son los polímeros empleados con mayor frecuencia debido a que sus cadenas se entrecruzan mediante fuerzas intermoleculares débiles lo cual determina la flexibilidad y estabilidad de las PIM. Dentro de estos se encuentran el triacetato de celulosa (CTA), cloruro de polivinilo (PVC), acetato butirato de celulosa (CAB), propionato de acetato de celulosa (CAP) y tributirato de celulosa (CTB) (Gherasim *et al.*, 2011). Parte importante de la formación de la PIM es la apropiada selección del disolvente, ya que de esto dependerá su morfología y estabilidad.

Considerando lo anterior, en el presente trabajo se evaluó la influencia de la concentración de plastificante y de la naturaleza del solvente empleado en la elaboración de una PIM de poliestireno expandido (Pst) reciclado de contenedores de comida, el cual, debido a su versatilidad, se ha convertido en un problema ambiental por lo que su estudio y reutilización en diversos campos como el tratamiento de efluentes contaminados se ha convertido en una necesidad.

2. Materiales y métodos

2.1 Elaboración de las membranas poliméricas de inclusión (PIM)

Para la elaboración de las PIM, Figura 1, se prepararon 5 mL de diferentes soluciones poliméricas que contenía el 14% de poliestireno expandido

Tabla 1: Aplicaciones de las membranas poliméricas de inclusión y composición empleada.

Analito	Plastificante	Agente extractante	Soporte polimérico	Aplicación
Au(III)	TEHP	TDD	CTA	Medios ácidos en presencia de Cu(II), Pd(II) y Pt(II) (Lemus-Solorio, <i>et al.</i> , 2021).
Co(II)	DOA	DNNS	CTA	Sistemas acuosos (Shirzad, M., y Karimi, M., 2020)
Cr(VI)	NPOE	Aliquat 336	PVDF	Mezcla de metales Cd(II), Pb(II), Fe(II), Zn(II), Cu(II), Ni(II) y Co(II) (Sellami <i>et al.</i> , 2020)
Zn(II)	NPOE	D ₂ EHPA	PVC	Medios ácidos (Mahmoud <i>et al.</i> , 2024)
Cd(II), Pb(II)	TBEP, NPOE, TEHP	D ₂ EHPA Aliquat 336	CTA	Agua de río (Macías y Rodríguez de San Miguel 2023)
Cu(II), Cd(II), Ni(II)	TBP	2-APBH	PVC	Agua natural (López-Guerrero <i>et al.</i> , 2020)
Co(II), Cu(II), Ni(II), Zn(II)	NPPE	2-alquilimidazol	CTA	Sistemas acuosos. (Radzimska-Lenarcik <i>et al.</i> , 2021)
CIP	DOP	B ₂ EHP Aliquat 336	PVC CTA	Aguas residuales (Olasupo <i>et al.</i> , 2022).

2-APBH: piridina-2-acetaldehído benzoilhidrazona; B₂EHP: Bis-2-(etilhexil)fosfato CIP: Ciprofloxacina; CTA: Triacetato de celulosa; D₂EHPA: Ácido di-(2 etilhexil)fosfórico; DNNS: Ácido dinonil-naftaleno-1-sulfónico; DOA: Dioctiladipato; DOP: Ftalato de dioctilo; NPOE: Nitrofenil octiléter; NPPE: Nitrofenil pentil éter; PVC: Cloruro de polivinilo; PVDF: Fluoruro de polivinilideno; TBEP: tris(2-butoxietilo) fosfato; TEHP: fosfato de tris(2-etilhexilo); TBP: Tributilfosfato; TDD: 1,2-tetradecanodiol; TEHP: Tris (2-etilhexil) fosfato.

recuperado de productos empleados para el empaque de alimentos (Pst), variando las proporciones del disolvente empleado (diclorometano, DCM Meyer $\geq 99.5\%$ y tolueno Sigma-Aldrich $\geq 99.5\%$). A esta solución se les adicionaron diversas cantidades de plastificante (nitrofeniloltiléter, NPOE, Fluka Analytical $\geq 99\%$) con la finalidad de proporcionarle cierta flexibilidad al soporte polimérico y el 12% de agente extractante (Aliquat 336, Aldrich) para proporcionarle selectividad. La solución final fue vertida en un cristizador para su evaporación a temperatura ambiente obteniéndose así las diversas membranas (Ling *et al.*, 2017). El espesor de la membrana fue controlado con el diámetro de cristizador (9 cm para el espeso de ~ 0.08 mm y 6.6 cm para ~ 0.17 mm).

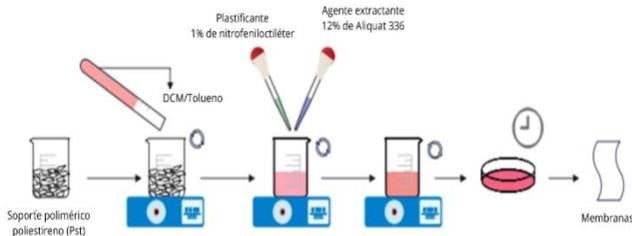


Figura 1: Elaboración de las membranas poliméricas de inclusión.

Cada una de las PIM elaboradas fueron caracterizadas por microscopía electrónica de barrido con un equipo JEOL JSM-6300 con un recubrimiento de oro y empleando un potencial de 10 KV. Una aproximación del ángulo de contacto fue obtenida analizando una gota de $3 \mu\text{L}$ colocada en diferentes puntos de las membranas elaboradas mediante un microscopio digital.

La porosidad de las membranas fue determinada por el método gravimétrico propuesto por Ahmad *et al.* (Ahmad *et al.*, 2018). Para lo cual se sumergieron 2.5 cm^2 de las diferentes PIM en 10 mL de agua desionizada a temperatura ambiente por un lapso de 24 h. Después de este tiempo, se retiró el exceso de humedad de la PIM para posteriormente ser pesada (W_{humeda}) y secada a $45 \text{ }^\circ\text{C}$ por 2h con la finalidad de obtener el peso final de la membrana (W_{seca}). El porcentaje de porosidad (\emptyset) fue obtenido mediante la siguiente Ecuación

$$\emptyset = \frac{W_{\text{humeda}} - W_{\text{seca}}}{\delta_w AL} \quad (1)$$

Donde δ_w es la densidad del agua (g/cm^3), A el área de contacto (cm^2) y L el espesor de la PIM (cm). El módulo de Young fue determinado con un equipo de tensión/deformación Pasco AP-8214 mediante la pendiente en la parte de la baja de la curva de elasticidad/deformación (Vázquez *et al.*, 2014).

2.2 Experimentos de extracción

Para la evaluación de la eficiencia de la extracción de las PIM, en un sistema en batch, se puso en contacto 5 cm^2 de la membrana en 5 ml de una solución de 400 mg/L de ácido acetilsalicílico (AAS). El AAS remanente en la solución después del proceso de extracción fue cuantificado por la técnica de espectrofotometría visible con un equipo Lambda 40 (Perkin-Elmer, S.A de C.V.) mediante la obtención de un complejo de salicilato de hierro $[(\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{COO})_3\text{Fe}]$ a una longitud de onda de 526 nm. La formación del complejo se

realizó colocando 3mL de la solución recuperada de AAS con $30 \mu\text{L}$ de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Sigma $\geq 98\%$) 1M acorde a lo reportado por Laviana (Laviana, 2020). Cada experimento se llevó a cabo por triplicado.

Para conocer las condiciones óptimas de trabajo se realizó un diseño experimental Taguchi de cuatro factores (pH, tiempo de contacto, espesor de la membrana y área de contacto) con dos niveles (N_1 y N_2) tal y como se muestra en la Tabla 2. El análisis de datos se llevó a cabo con el programa Minitab 17.

Tabla 2: Factores controlables y niveles asociados.

Factor	Descripción	Valor codificado	
		N_1	N_2
A	pH	3	4
B	Tiempo de contacto (h)	4	12
C	Espesor de la membrana (mm)	0.08	0.17
D	Área de contacto (cm^2)	2.5	5.0

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de las PIM

3.1.1 Morfología de las PIM

Para que una PIM pueda ser empleada en la extracción y/o transporte de especies es necesario que muestren estabilidad y cierta flexibilidad (Pereira *et al.*, 2009) por lo que, a cada una de las membranas elaboradas mostrados en la Figura 2, se les realizó una inspección visual con las propiedades que se muestran en la Tabla 3. Ya que el polímero empleado es un termoplástico (Giuliani *et al.*, 2020), la membrana formada es el resultado de los procesos de entrecruzamiento y las altas fuerzas intermoleculares lo que le proporciona cierta rigidez y estabilidad desde la ausencia de enlaces covalentes intermoleculares (Nghiem *et al.*, 2006), (Sellami *et al.*, 2021).

Tabla 3: Composición y propiedades físicas de las diferentes membranas poliméricas de inclusión elaboradas.

PIM	Solvente (%)		Flexibilidad	Estabilidad física
	DCM	Tolueno		
1	100	0	Ligera	Alta
2	75	25	Ligera	Alta
3	50	50	Ligera	Alta
4	25	75	Ligera	Media
5	0	100	Ligera	Media

Pst: Poliestireno, DCM: Diclorometano

Las propiedades del disolvente empleado en la elaboración de las PIM pueden ocasionar diferentes morfologías en la membrana, por ejemplo, si no existe una buena solubilidad entre el polímero soporte y el disolvente las PIM formadas no son homogéneas y tienen una resistencia mecánica baja. Por otro lado, un tiempo de evaporación demasiado corto o largo, puede ocasionar que no se tenga una adecuada formación de la membrana, mientras que una velocidad media de evaporación puede favorecer la formación de poros, ya que la formación de capas densas se ve favorecida si la eliminación del disolvente es lenta (Carner *et al.*, 2019), (Dong, *et al.*, 2021).

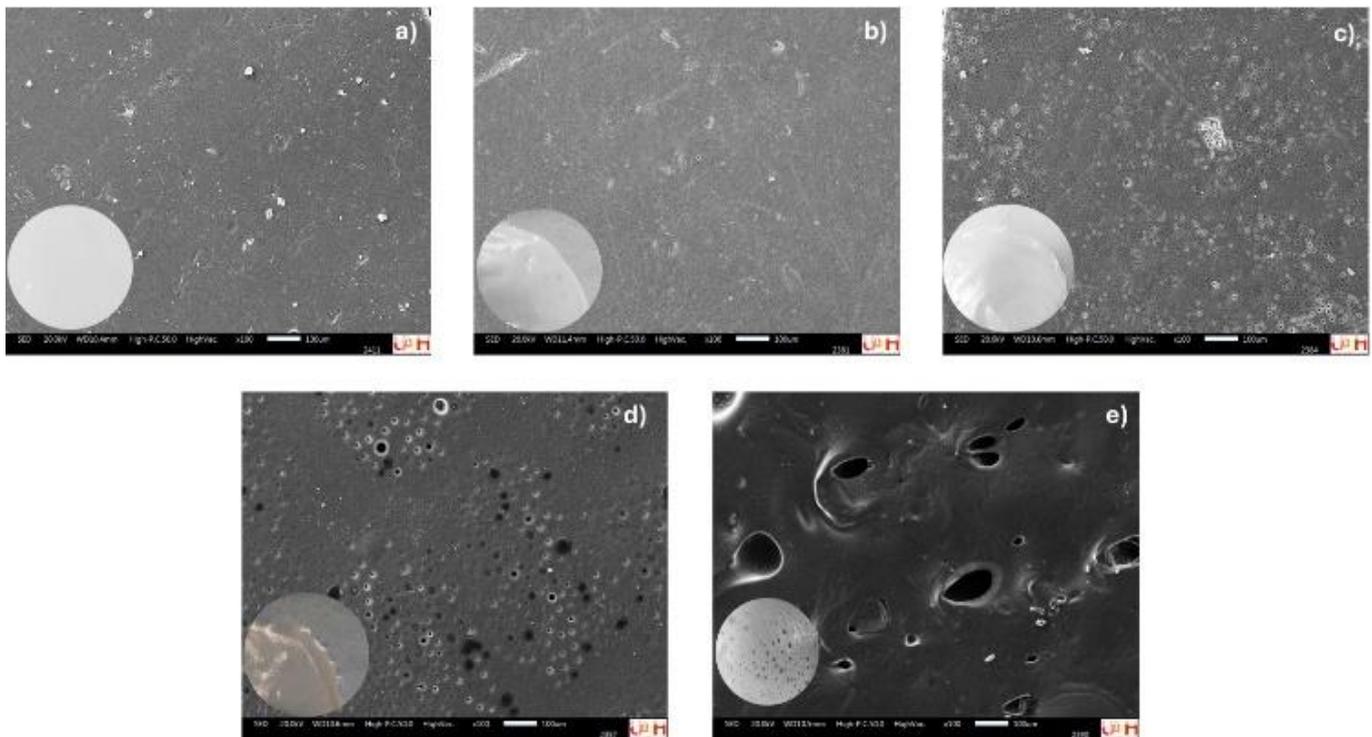


Figura 2: Análisis físico y de microscopía electrónica de barrido de las diferentes PIM obtenidas. Composición de las membranas 14% de poliestireno expandido, 12% de agente extractante, 1 % de plastificante, porcentaje de solvente (DCM/Tolueno) a) 100/0, b) 75/25 c) 50/50, d) 25/75, e) 0/100.

Es importante mencionar que la viscosidad de la solución polimérica también influye en la morfología de la PIM, ya que esta puede facilitar la formación de cavidades al influir sobre la forma en la que se lleva a cabo la evaporación del disolvente (Vera *et al.*, 2019).

En este sentido, los disolventes empleados en este trabajo tienen diferentes propiedades físicas, por ejemplo, el DCM tiene un punto de ebullición de 40°C y una viscosidad de 0.425 cP (Oregon, s.f.), mientras que el punto de ebullición del tolueno es de 111°C y su viscosidad de 0.6cP (Kara, 2023), por lo que las características y morfologías de las PIM elaboradas serán diferentes.

La Figura 2 muestra que cuando se emplea únicamente DCM en la solución polimérica se tiene una superficie homogénea lo cual indica que existe un buen entrecruzamiento entre el agente extractante y el polímero empleado. Por otro lado, se puede observar que el incremento de tolueno en la solución polimérica favorece la formación de cavidades de mayor tamaño debidas a las burbujas de aire atrapadas en la formación de la PIM debida a la viscosidad del medio (Vera *et al.*, 2019), (Jin *et al.*, 2015).

3.1.2 Porcentaje de porosidad

La porosidad de una PIM puede indicar como es su estructura ya que se encuentra relacionada con la separación de las cadenas poliméricas, el agente extractante y el plastificante que la conforman (Fontàs *et al.*, 2007). De acuerdo con la Figura 3, se puede observar que el incremento de DCM (punto de ebullición 39.8°C) en la solución polimérica aumenta el porcentaje de porosidad de la membrana, esto puede atribuirse a que al tener un menor punto de ebullición que el tolueno (110.6°C) el tiempo de

evaporación es más corto lo que favorece la formación de poros de menor tamaño tal y como se discutió en el punto anterior. (Kebiche-Senhadji *et al.*, 2010).

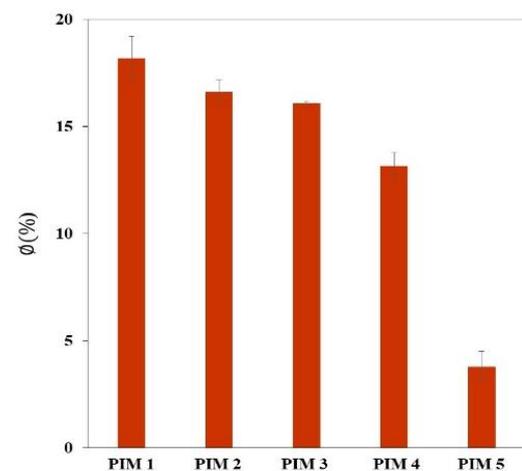


Figura 3: Porcentaje de porosidad (ϕ) obtenido para las diferentes PIM elaboradas.

3.1.3 Hidrofobicidad de las PIM

Por otro lado, la hidrofobicidad es otra de las características de la membrana en la que influye el soporte polimérico, ya que, se encuentra relacionada con su estabilidad, la afinidad que presenta con los diversos componentes y la forma de interacción y transporte con los diversos analitos de interés (Kazemzadeh *et al.*, 2020).

Como se puede observar en la Figura 4, los ángulos de contacto obtenidos para las diferentes PIM se encuentran en un intervalo de 26 y 30° lo cual permite suponer que todas

las membranas tienen el mismo carácter hidrofílico proporcionado por los grupos amonio del agente extractante inmovilizado en cada una de ellas es la misma (Vázquez et al., 2014), (Sellami et al., 2021).

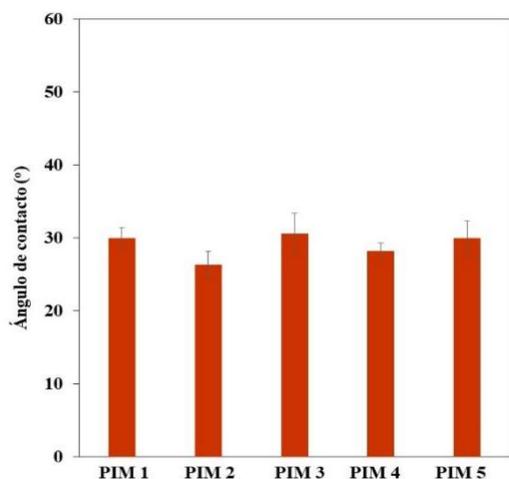


Figura 4: Ángulos de contacto obtenidos para las diferentes PIM elaboradas.

3.2 Análisis del efecto de la composición de la PIM en la extracción de especies

De acuerdo con las pruebas de caracterización realizadas se pudo observar que, a una menor concentración de tolueno empleado en la elaboración de las PIM, se tiene una mejor formación y estabilidad de la membrana, debido a que la viscosidad de la solución polimérica modifica la interacción de los componentes de la membrana y retrasa el proceso de formación (Prihatiningtyas et al. 2020). Sin embargo, con la finalidad de conocer cuál de ellas permite una mejor extracción se evaluó cada membrana en un sistema batch empleando el ácido acetilsalicílico (AAS) el cual es un contaminante emergente que en dosis elevadas genera alteraciones del estado mental, hipertermia, déficit neurológico, convulsiones, coma, edema pulmonar, hipotensión, falla renal aguda y trastornos hidroelectrolíticos severos (Sepúlveda et al., 2018).

4: Porcentaje de extracción de las diversas PIM elaboradas. Condiciones de experimentación 400 ppm de AAS a 8hr de extracción.

PIM	Extracción (%) *
1	82.78 (2.74)
2	76.89 (5.64)
3	71.25 (0.57)
4	75.78 (7.06)
5	76.19 (9.66)

*CV entre paréntesis.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Como se puede observar, la PIM 1 es la que presenta un mayor porcentaje de extracción lo cual se debe probablemente a la porosidad de la membrana, ya que un incremento en esta permite contar con una mayor superficie de interacción (Sellami et al., 2021). Ya que la PIM 1 es la que permite tener un mayor porcentaje de extracción, se procedió a encontrar las condiciones óptimas extracción mediante un diseño experimental Taguchi L8 de acuerdo

con la matriz de diseño, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5: Matriz del diseño experimental Taguchi.

Experimento	A	B	C	D	Extracción (%)*
1	1	1	1	1	31.76 (2.04)
2	1	1	2	2	65.96 (0.52)
3	1	2	1	2	61.59 (1.77)
4	1	2	2	1	35.86 (7.41)
5	2	1	1	2	30.76 (2.47)
6	2	1	2	1	23.79 (9.57)
7	2	2	1	1	15.74 (9.64)
8	2	2	2	2	83.90 (7.24)

A: pH (3 y 4), B: Tiempo de contacto (4 y 12h), C: Espesor de la PIM (0.08 y 0.17 mm), y D: Área de contacto (2.5 y 5 cm²); *CV entre paréntesis.

De acuerdo con las siguientes Figuras (5a y 5b) el mejor porcentaje de extracción se da a un pH de 3 donde la especie del AAS se encuentra ionizada (pKa=3.5) (Vieira et al., 2019) lo cual favorece la interacción del analito con el Aliquat 336 el cual es un agente extractante por intercambio iónico (Zsabka et al., 2018). Es importante mencionar que en estas condiciones la PIM no muestra inestabilidad. Por otro lado, se puede observar que un incremento en el tiempo de contacto y en el espesor de la membrana ocasionan un mayor porcentaje de extracción, siendo el área de contacto la que produce un mayor efecto en la extracción. Lo anterior puede atribuirse a que se incrementa el intercambio iónico entre el agente extractante y el AAS debido al aumento del agente extractante inmovilizado en la membrana (Wang et al., 2020), (Kunene et al., 2020). Lo anterior pone en evidencia que los parámetros concernientes a la composición de la membrana son los que más influyen en el funcionamiento de la misma confirmando así la importancia de su estudio.

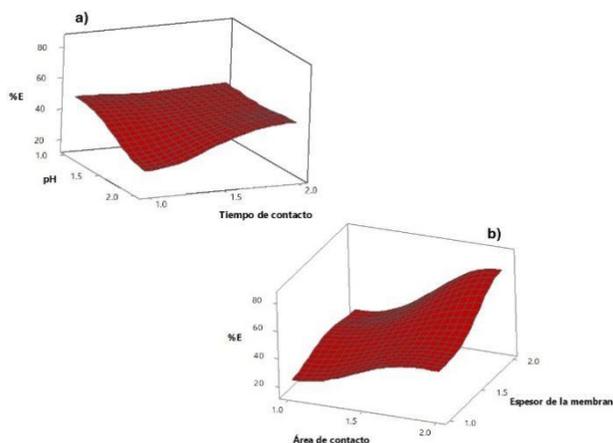


Figura 5: Gráficos de superficie de respuesta. a) Interacción entre el tiempo de contacto y el pH b) Interacción entre el área de contacto y el espesor de la membrana.

El análisis de varianza, mostrado en la Tabla 6, muestra que, de todos los factores evaluados, el área de contacto afecta significativamente al porcentaje de extracción, mientras que el resto de los factores pueden manejarse de acuerdo a las condiciones que facilite el proceso de extracción. Considerando esto, las condiciones óptimas obtenidas son: pH 3, tiempo de contacto 12 h, espesor de la membrana 0.17 mm y 5 cm² área de contacto por lo que son

las que se emplearon para pruebas posteriores.

Tabla 6: Análisis de varianza para la media.

Factores	GL	SC	CM	F	P
A	1	210.0	210.0	0.99	0.392
B	1	251.1	251.1	1.19	0.355
C	1	606.6	606.5	2.87	0.189
D	1	2280.5	2280.5	10.80	0.046
Error residual	3	633.3		211.1	
Total	7	3981.4			

A: pH (3 y 4), B: Tiempo de contacto (4 y 12h), C: Espesor de la PIM (0.08 y 0.17 mm), y D: Área de contacto (2.5 y 5 cm²); *CV entre paréntesis.

3.3 Influencia de la concentración del plastificante dentro de la PIM

Es necesario llevar a cabo la evaluación de la cantidad de plastificante que se emplea en la elaboración de la PIM debido a que puede modificar su flexibilidad y permeabilidad reduciendo así las fuerzas intermoleculares entre todos sus componentes (Zawierucha *et al.*, 2020) (Zante *et al.*, 2021). Para lograr lo anterior, se evaluaron diversas concentraciones de NPOE en un intervalo de 1.5% hasta el 12.5% con los resultados de la Tabla 7. Como se puede observar el porcentaje de extracción se ve afectado a partir de una concentración del 10% lo cual se puede atribuir a que, al existir un exceso de plastificante, este migra a la interfase de la membrana lo que crea una barrera adicional que impide la correcta interacción entre la PIM y el analito (Nghiem *et al.*, 2006).

Tabla 7: Evaluación de la influencia de la concentración de NPOE. Condiciones de experimentación: 400 ppm de AAS a 12hr de extracción.

PIM	Concentración de NPOE (%)	Extracción (%) *
6	1.0	83.90 (7.24)
7	2.0	80.49 (0.78)
8	4.3	80.32 (7.80)
9	6.7	76.79 (5.55)
10	8.3	58.31 (0.17)

*CV entre paréntesis.

Con la finalidad de observar la modificación del plastificante sobre la elasticidad de las PIM se realizó una aproximación del módulo de Young (Y) de aquellas membranas que podían presentar una mayor diferencia de elasticidad (PIM 6 y 9). De este análisis se observó que el valor Y ($Y_{PIM6} = 2$ MPa y $Y_{PIM9} = 3$ MPa) incrementa conforme lo hace la cantidad de NPOE lo cual indica una disminución en la resistencia mecánica debido al exceso de plastificante (Nghiem *et al.*, 2006).

4. Conclusiones

En el presente trabajo se evaluó el efecto del tipo de disolvente sobre la morfología de una PIM de Pst observándose que la velocidad de evaporación es un factor primordial en la formación de la membrana ya que al emplear DCM esta es más estable y con una superficie homogénea lo que favorece el porcentaje de extracción del AAS (~83%). Es importante mencionar que esto no influye en la forma de inmovilización del agente extractante ya que

las diferentes configuraciones de la PIM desarrolladas presentan el mismo carácter hidrofílico, al mismo tiempo que un incremento en la concentración del plastificante en la membrana disminuye su resistencia mecánica.

Todo lo anterior permite concluir que la membrana propuesta puede contribuir al desarrollo de métodos de tratamiento económicos y amigables con el medio ambiente que permitan su preservación al eliminar contaminantes presentes en sistemas acuosos como el ácido acetilsalicílico (AAS), al mismo tiempo que se realiza el reciclaje y disminución de materiales poliméricos de un solo uso.

Agradecimientos

M.E.P.H, C.A.G.V, I.S.I. e I.P.S agradecen al SNI por el apoyo recibido.

Referencias

- Babedi, L., Tadie, M., von der Heyden, B. P., & Chareev, D. A. (2023). A rest potential study of impurity (As, Au, Ni and Co) bearing synthetic pyrite in alkaline flotation conditions. *Minerals Engineering*, 202, 108277.
- Fontàs C., Tayeb R., Dhabbi M., Gaudichet E., Thominet F., Roy P., Steenkeste K., Pierre M., Tingry S., Tronel-Peyroz E., Seta P., (2007). Polymer inclusion membranes: The concept of fixed sites membrane revised. *Journal of Membrane Science* 290, 62-72. DOI:10.1016/j.memsci.2006.12.019.
- García-Rodríguez, A., Matamoros, V., Kolev, S. D., & Fontàs, C. (2015). Development of a polymer inclusion membrane (PIM) for the preconcentration of antibiotics in environmental water samples. *Journal of membrane science*, 492, 32-39. DOI:10.1016/j.memsci.2015.05.037
- Gherasim C. V., Cristea, M. G., Vasile C. B., (2011). New polymer inclusion membrane. Preparation and characterization. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 6(4).
- Giuliani F., Autelitano F., Garilli E., Montepara A., (2020). Expanded polystyrene (EPS) in road construction: Twenty years of Italian experiences. *Transportation Research Procedia* 45, 410-417. DOI:10.1016/j.trpro.2020.03.033.
- Jefferson, M., Yenial-Arslan, U., Evans, C., Curtis-Morar, C., O'Donnell, R., Parbhakar-Fox, A., & Forbes, E. (2023). Effect of pyrite textures and composition on flotation performance: A review. *Minerals Engineering*, 201, 108234.
- Jayawardane B. M., Cattrall R. W., Kolev D. S., (2013). The use of a polymer inclusion membrane in a paper-based sensor for the selective determination of Cu(II). *Analytica Chimica Acta* 803, 106-112. DOI:10.1016/j.aca.2013.07.029
- Jha R., Rao M.D., Meshram A., Verma H. R., Singh K. K., (2020). Potential of polymer inclusion membrane process for selective recovery of metal values from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Cleaner Production* 265. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121621
- Jin T., Zhao Z., Chen K., (2015). Preparation of a poly(vinyl chloride) ultrafiltration membrane through the combination of thermally induced phase separation and non-solvent-induced phase separation. *Journal Of Applied Polymer Science* 133 (5). DOI:10.1002/app.42953
- Karal, (2023). Hoja de datos de seguridad. URL: <https://www.karal.com.mx/admin/seguridad/uploads/-%20TOLUENO%204080.pdf>
- Kazemzadeh H., Karimi-Sabet J., Towfighi J., Adhami A., (2020). Evaluation of polymer inclusion membrane efficiency in selective separation of lithium ion from aqueous solution. *Separation and Purification Technology* 251, 117298. DOI:10.1016/j.seppur.2020.117298
- Kebeche-Senhadi O., Tingry S., Seta P., Benamor M., (2010). Selective extraction of Cr(VI) over metallic species by polymer inclusion membrane (PIM) using anion (Aliquat 336) as carrier. *Desalination*, 258(1-3), 59-65. DOI: 10.1016/j.desal.2010.03.047
- Keskin B., Zeytuncu-Gökoğlu B., Koyuncu I., (2021). Polymer inclusion membrane applications for transport of metal ions: A critical review. *Chemosphere* 279, 130604. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130604
- Kunene P., Akinbami O., Motsoane N., Tutu H., Chimuka L., Richards H., (2020). Feasibility of polysulfone as base polymer in a polymer

- inclusion membrane: Synthesis and characterisation. *Journal of Membrane Science and Research* 6(2), 203-210. DOI: 10.22079/JMSR.2019.111596.1278
- Laviana O., (2020). Determinación experimental de la constante de formación del complejo Fe(III)-salicilato. Grado en química universidad de Olaya.
- Lemus-Solorio A., Núñez-Gaytán M. E., Núñez-Gaytán A. M., Lemus-Solorio M. A., Núñez-Hernández S., (2021). Separación de metales en soluciones acuosas mediante membranas poliméricas con extractantes novedosos. *Revista de Ciencias Tecnológicas* 4, 99-111.
- Ling, Y. Y., & Suah M. (2017). Extraction of malachite green from wastewater by using polymer inclusion membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(1) 785-794. DOI:10.1016/j.jece.2017.01.001
- López-Guerrero, M. M., Granado-Castro, M. D., Díaz-de-Alba, M., Lande-Durán, J., & Casanueva-Marengo, M. J. (2020). A polymer inclusion membrane for the simultaneous determination of Cu(II), Ni(II) and Cd(II) ions from natural waters. *Microchemical Journal*, 157, 104980. DOI:10.1016/j.microc.2020.104980
- Macías, M., & Rodríguez de San Miguel, E. (2023). On the use of polymer inclusion membranes for the selective separation of Pb (II), Cd (II), and Zn (II) from seawater. *Membranes*, 13(5), 512. DOI:10.3390/membranes13050512
- Mahmoud H., Ncib S., Othmen K., Al-Hazmy S., Dammak L., Elaloui E., Bouguerra W. (2024). Evaluation of Poly (Vinyl Chloride)/2-Nitrophenyl Octyl Ether/Di(2-Ethylhexyl) Phosphoric Acid Polymer Inclusion Membrane Performance for Zinc Recovery and Separation. *Chemistry Africa*. DOI: 10.1007/s42250-023-00853-7
- Martínez, L. P. (1999). Caracterización estructural y superficial. Universidad Valladolid. Valladolid Miguel de Cervantes. DOI: 10.35376/10324/67
- Nghiem L.D., Mornane P., Potter I. D., Perera J. M., Cattrall R. W., Kolev S. D., (2006). Extraction and transport of metal ions and small organic compounds using polymer inclusion membranes (PIMs). *Journal of Membrane Science* 281(1-2), 7-41. DOI:10.1016/j.memsci.2006.03.035.
- Noble, R. D., (1987). Membrane Contactors and Integrated Membrane Operations. *Separation Science and Technology* 22, 2-3. 731-743.
- Nunes S. P., Culfaz-Emecen, P. Z., Guy Z. R., Visser T., Kooops G. H., Wanqin J., Ulbricht M., (2020). Thinking the future of membranes: Perspectives for advanced and new membrane materials and manufacturing processes. *Journal of Membrane Science* 598, 117761. DOI:10.1016/j.memsci.2019.117761
- Obotey, E. E., Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes* 10(5), 89. DOI:10.3390/membranes10050089.
- Olasupo, A., Sadiq, A. C., & Suah, F. B. M. (2022). A novel approach in the removal of ciprofloxacin antibiotic in an aquatic system using polymer inclusion membrane. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102523.
- Oregon (s.f). Ficha técnica del cloruro de metileno. URL:<https://oregonchem.com/files-oregon/uploads/ft/3e1799ed2e25237b0dbbf32ab4b6e911.pdf>
- Pereira N., John A., Cattrall R. W., Perera J. M., Kolev, S. D., (2009). Influence of the composition of polymer inclusion membranes on their homogeneity and flexibility. *Desalination*, 236(1-3), 327-333. DOI:10.1016/j.desal.2007.10.083
- Piotr S., Haopeng G., Krzysztof D., Zbigniew R., Andrzej W., Kateryna F., Joanna K., Wojciech K., (2021). New reactive ionic liquids as carriers in polymer inclusion membranes for transport and separation of Cd(II), Cu(II), Pb(II), and Zn(II) ions from chloride aqueous solutions. *Journal of Membrane Science* 638, 119674. DOI:10.1016/j.memsci.2021.119674
- Prihatiningtyas, I., Li, Y., Hartanto, Y., Vananroye, A., Coenen, N., & Van der Bruggen, B. (2020). Effect of solvent on the morphology and performance of cellulose triacetate membrane/cellulose nanocrystal nanocomposite pervaporation desalination membranes. *Chemical Engineering Journal*, 388, 124216. doi:10.1016/j.cej.2020.124216
- Radzimska-Lenarcik, E., Maslowska, K., & Urbaniak, W. (2021). Removal of copper (II), zinc (II), cobalt (II), and nickel (II) ions by PIMs doped 2-Alkylimidazoles. *Membranes*, 12(1), 16. DOI: 10.3390/membranes12010016
- Sellami F., Kebiche-Senhadj O., Marais S., Colasse L., Fatyeyeva K., (2020). Enhanced removal of Cr(VI) by polymer inclusion membrane based on poly(vinylidene fluoride) and Aliquat 336. *Separation and Purification Technology* 248, 117038. DOI:10.1016/j.seppur.2020.117038
- Sellami F., Kebiche-Senhadj O., Marais S., Lanel C., Fatyeyeva K., (2021). Novel Poly(Vinylidene Fluoride)/Montmorillonite Polymer Inclusion Membrane: Application to Cr(VI) Extraction from Polluted Water. *Membranes* 11(9), 682. DOI:10.3390/membranes11090682
- Sepúlveda R. A., Ortega M., Donoso N., Jara A., (2018). Intoxicación por ácido acetilsalicílico, fisiopatología y manejo. *Revista médica de Chile* 146 (11), 1309-1316. DOI: 10.4067/S0034-98872018001101309
- Shirzad, M., & Karimi, M. (2020). Statistical analysis and optimal design of polymer inclusion membrane for water treatment by Co (II) removal. *Desalination and Water Treatment*, 182, 194-207
- Vázquez M., Romero V., Fontàs C., Anticó E., Benavente J., (2014). Polymer inclusion membranes (PIMs) with the ionic liquid (IL) Aliquat 336 as extractant: Effect of base polymer and IL concentration on their physical-chemical and elastic characteristics. *Journal of Membrane Science*, 455, 312-319. DOI:10.1016/j.memsci.2013.12.072
- Vera R., Anticó E., Eguiazabal J.L., Aranburu N., Fontàs C., (2019). First Report on a Solvent-Free Preparation of Polymer Inclusion Membranes with an Ionic Liquid. *Molecules* 24(10), 1845. DOI:10.3390/molecules24101845
- Vieira A. W., Molina G., Mageste A. B., Rodrigues G. D., Lemos L. R., (2019). Partitioning of salicylic and acetylsalicylic acids by aqueous two-phase systems: Mechanism aspects and optimization study. *Journal of Molecular Liquids*. 296, 111775. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111775.
- Wang D., Liu J., Chen J., Liu O., Zeng H., (2020). New insights into the interfacial behavior and swelling of polymer inclusion membrane (PIM) during Zn (II) extraction process. *Chemical Engineering Science* 220, 115620. DOI:10.1016/j.ces.2020.115620.
- Zante G., Boltoeva M., Masmoudi A., Barillon R., Trébouet D., (2021). Supported ionic liquid and polymer inclusion membranes for metal separation. *Separation & Purification Reviews* 51(1), 100–116. DOI:10.1080/15422119.2020.1846564
- Zawierucha I., Nowik-Zajac A., Malina G., (2020). Selective Removal of As(V) Ions from Acid Mine Drainage Using Polymer Inclusion Membranes. *Minerals*, 10(10), 909. DOI:10.3390/min10100909
- Zsabka P., Van Hecke K., Adriaensen L., Wilden A., Modolo G., Verwerf M., Cardinaels T., (2018). Solvent extraction of Am(III), Cm(III) and Ln(III) ions from simulated highly active raffinate solutions by TODGA diluted in Aliquat-336 nitrate ionic liquid. *Solvent extraction and ion Exchange*. 36(6), 519-541. DOI: 10.1080/07366299.2018.1545288
- Zuo K., Wang K., DuChanois R.M., Fang O., Deemer E.M., Huang X., Xin R., Said I.A., He Z., Feng Y., Walker W.S., Lou J., Elimelech M., Huang X., Qilin L. (2021). Selective membranes in water and wastewater treatment: Role of advanced materials 50, 516-532. DOI:10.1016/j.mattod.2021.06.013