UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO-CHILE



DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS A PARTIR DE POLIESTIRENO EXPANDIDO Y SOLVENTES VERDES

FERNANDA ANDREA TRONCOSO ESPINOSA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERA QUÍMICA

PROFESORA GUÍA
DRA. PAULA GUERRA PINTO

PROFESORA CORREFERENTE
DRA. CAMILA MERY ARAYA

PROFESOR CORREFERENTE
DR. JAIME CHACANA OLIVARES

SEPTIEMBRE – 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo y caracterización de membranas a partir de poliestireno expandido y solventes verdes

Nombre del candidato(a): Fernanda Andrea Troncoso Espinosa_____

Carrera / Grado: Magister en Ciencias de la Ingeniería Química

Campus: San Joaquín **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Paula Alejandra Guerra Pinto, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☐x El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 9 de noviembre de 2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06/11/2026_____ **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al proyecto FONDEF TA23I10045 por financiar este trabajo y a su director Jaime Chacana, PhD, por confiar en el desarrollo de esta tesis y su apoyo durante la investigación.

A la Dra. Paula Guerra, por su apoyo a lo largo de la carrera en distintas etapas y por darme la oportunidad para realizar la tesis e introducirme al mundo de la investigación.

A Camila Mery, PhD, por ser parte de la comisión evaluadora de esta tesis y sus comentarios positivos sobre el trabajo.

A mi familia, quienes son el pilar fundamental de mi vida y han hecho que todo esto sea posible.

A mis amigos, por estar presentes a lo largo de este proceso, su amistad me ha acompaño de muchas maneras y estaré eternamente agradecida.

A Jeamilette Mendoza y María Victoria Riquelme, por su apoyo y orientación a lo largo del trabajo experimental.

A la Unidad de Microscopía Avanzada UMA UC, por su apoyo en el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM).

RESUMEN EJECUTIVO

La creciente escasez hídrica a nivel global y nacional ha impulsado el desarrollo de tecnologías para la obtención de agua de fuentes no convencionales, como el agua de mar. Dentro de estas encontramos las membranas, que son barreras sólidas que permiten separar elementos de manera selectiva gracias a la aplicación de una fuerza impulsora. Sin embargo, la fabricación tradicional resulta poco sostenible por el uso de polímeros derivados del petróleo y solventes altamente contaminantes; además de su corta vida útil que genera volúmenes considerables de residuos.

Ante esta problemática, se planteó la hipótesis de que es posible fabricar membranas a partir de poliestireno expandido (EPS) y solventes: d-limoneno y Trioctil trimelitato (TOTM), empleando nuevas condiciones de diseño y operación que potencien sus propiedades fisicoquímicas y maximicen su rendimiento. En base a esto, el objetivo de esta investigación consistió en desarrollar a nivel laboratorio membranas filtrantes a partir de EPS y solventes verdes para el tratamiento de agua. El trabajo se estructuró en 3 etapas: i) evaluar las condiciones de diseño que permiten obtener membranas viables estructuralmente; ii) evaluar el desempeño bajo distintas condiciones de operación, iii) y caracterizar las propiedades fisicoquímicas y morfológicas para su clasificación y proyección a gran escala.

Para ello, se planteó un diseño factorial completo para evaluar el efecto de 5 variables: tipo de solvente verde (d-limoneno y TOTM), concentración de polímero (15%, 20% y 25% p/p), concentración de PVP (0%, 0,75% y 1,5% p/p), espesor de película (200 y 300 μm) y soporte mecánico (con o sin TNT). Con ello se fabricaron un total de 36 modelos de membranas diferentes, los cuales fueron evaluados mediante pruebas de permeabilidad, rechazo de sales (%R), y disminución de turbidez ($\%\tau$). Posteriormente, los modelos con mejor rendimiento fueron caracterizados mediante espectroscopía FT-IR, microscopía electrónica de barrido (SEM), gravimetría (porosidad), tamaño medio de poros y humectabilidad (ángulo de contacto).

A partir del diseño experimental, se determinó la inviabilidad de utilizar TOTM como solvente verde y del uso de TNT de poliéster como soporte mecánico y además se confirmó la viabilidad técnica de fabricar membranas planas utilizando EPS con d-limoneno como solvente verde. De ello, se obtuvo que la resistencia física de los modelos depende directamente de la concentración del polímero, la cual aumenta a mayor concentración de PS, y la porosidad va ligada directamente a la adición de PVP, presentando porosidades de 5% a 24%, y tamaños medio de poro de 0,24 a 0,41 μm, siendo los modelos con concentraciones altas de PVP los con mayor porosidad y tamaño de poros. También, los modelos presentan una amplia variabilidad en su permeabilidad, dependiendo directamente de su composición, además de sufrir una compactación estructural a medida que se eleva la presión operacional. Por otro lado, los modelos no son aptos para el rechazo de sales, presentando valores de rechazo muy bajos entre 0 y 4,5%, mientras que, si lo son para la disminución de turbidez, alcanzando remociones de hasta 34%.

Del rendimiento, se definen 6 modelos para caracterizar en términos de espectroscopia FT-IR, morfología, porosidad y humectabilidad, en donde finalmente 3 modelos presentan condiciones óptimas para operar en procesos cercanos a microfiltración siendo estas condiciones 25% de PS, junto con 0,75% de PVP y un espesor de 300 μm o 1,5% de PVP y espesores de 200 y 300 μm.

De esta forma, queda demostrado que es posible desarrollar membranas filtrantes a partir de poliestireno expandido reciclado y d-limoneno como solvente verde, y evaluar a nivel laboratorio cuales cumplen con las condiciones necesarias para ser utilizadas en procesos de microfiltración al presentar permeabilidades promedios cercanas a los 500 L\m^{2}hbar, operar a presiones entre 1-5 bar y disminuir la turbidez de partículas suspendidas con tamaños sobre 1 μm.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 1
1.1. Pregunta de investigación 4
1.2. Hipótesis 4
1.3. Objetivo general 4
1.4. Objetivos específicos 4
2. MARCO TEÓRICO 5
2.1. Membranas 5
2.1.1. Fuerza impulsora 5
2.1.2. Materiales y morfología 7
2.1.3. Configuración y geometría 8
2.1.4. Método de fabricación 8
2.1.5. Ecuaciones de diseño 9
2.2. Parámetros de solubilidad de Hansen 10
2.3. Polímeros 10
2.3.1. Poliestireno expandido 12
2.4. Solventes verdes 13
2.4.1. D-limoneno 13
2.4.2. Trioctil trimelitato 14
2.5. Generador de poros 14
2.6. Soporte mecánico 15
2.6.1. Tela no tejida 16
3. ESTADO DEL ARTE 17
4. DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA 22
4.1. Pruebas de compatibilidad 22
4.2. Diseño experimental 22
4.3. Metodología de preparación de membranas 23
4.3.1. Materiales 23
4.3.2. Fabricación de membranas 24
4.3.3. Rendimiento de las membranas 25
4.3.4. Caracterización de las membranas 26

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 31
5.1. Pruebas de compatibilidad 31
5.2. Fabricación de las membranas 34
5.3. Rendimiento de las membranas 38
5.3.1. Permeabilidad 38
5.3.2. Rechazo de sales 44
5.3.3. Disminución de turbidez 46
5.4. Caracterización de las membranas 48
5.4.1. FT-IR 49
5.4.2. Morfología 55
5.4.3. Porosidad y tamaño medio de poros 63
5.4.4. Humectabilidad 66
6. CONCLUSIONES 69
7. RECOMENDACIONES 71
8. REFERENCIAS 72
9. ANEXOS 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Materiales alternativos para membranas sustentables y verdes (Naeem et al., 2024). 2
Figura 2. Esquema de Economía lineal y circular (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). 3
Figura 3. Esquema general del proceso de membrana (Mulder, 1991).....5
Figura 4. Tela no tejida de poliéster comercial (Meriggi, 2026).....16
Figura 5. Diagrama simplificado de proceso de fabricación de membranas (elaboración propia). 24
Figura 6. Sistema de filtración para pruebas de rendimiento (elaboración propia). 25
Figura 7. Solución de 15% de PS con TOTM como solvente a 50°C.....32
Figura 8. Solución solidificada sobre placa de vidrio a temperatura ambiente (~20°C).....33
Figura 9. Membrana de 15% PS y TOTM posterior al baño de coagulación. 34
Figura 10. Flujo de permeado de membranas sin soporte mecánico a 1 bar.....39
Figura 11. Flujo de permeado de membranas sin soporte a 3 bar. 40
Figura 12. Flujo de permeado para membranas sin soporte a 5 bar. 41
Figura 13. Permeabilidad al agua de membranas a diferentes condiciones de diseño. 42
Figura 14. Flujo de permeado de membranas con soporte mecánico a 1 bar. 43
Figura 15. Permeabilidad de solución salina de membranas fabricadas sin soporte a 3 bar. 44
Figura 16. Resultados de rechazo de sales de membranas sin soporte mecánico a 3 bar. 45
Figura 17. Permeabilidad de solución de caolín de membranas sin soporte a 3 bar. 46
Figura 18. Resultados de disminución de turbidez de membranas sin soporte mecánico a 3 bar. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 19. Espectro FT-IR de membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18. 50
Figura 20. Espectros FT-IR reportados por A) Huhn-Ibarra et al. (2025) y B) Garcia-Ivars et al. (2017) 51
Figura 21. Espectro FT-IR reportado por Zulfi et al. (2018). 52
Figura 22. Comparación de espectros FT-IR de membranas M13 y M17. 53
Figura 23. Espectros FT-IR reportados por A) Arrosyid et al. (2023) y B) Swefi et al. (2025). ...53
Figura 24. Comparación de espectros FT-IR de las membranas; M4 y M16 arriba; M6 y M18 abajo. 54
Figura 25. Comparación de espectros FT-IR de membranas M17 y M18. 55

Figura 26. Imágenes SEM de la superficie de las membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18 a una magnitud de x250. 56

Figura 27. Imágenes SEM de la superficie de las membranas M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm) a la izquierda y M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm) a la derecha, en dos zonas distintas a magnificaciones de x250 y x4,0k de arriba hacia abajo.....57

Figura 28. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm) a la derecha y M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm) a la izquierda, en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k. 58

Figura 29. Imágenes SEM de la superficie de las membranas M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm) a la izquierda y M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm) a la derecha, en dos zonas distintas a magnificaciones de x250 y x4,0k de arriba hacia abajo.....58

Figura 30. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm) a la izquierda y M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm) a la derecha, en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k. 59

Figura 31. Imágenes SEM de la superficie de las membranas fabricadas por (a) inmersión en no-solvente y (b) evaporación reportadas por Dwi Nurherdiana et al. (2023). 60

Figura 32. Imágenes SEM de la superficie de las membranas M13 (25% PS, 0% PVP, 200 µm) a la izquierda y M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) a la derecha, en dos zonas distintas a magnificaciones de x250 y x4,0k, de arriba hacia abajo.....60

Figura 33. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas M13 (25% PS, 0% PVP, 200 µm) a la izquierda y M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) a la derecha, en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k. 61

Figura 34. Imágenes SEM de la superficie de las membranas con diferente contenido de PVP: a) 0% PVP, b) 2% PVP, c) 4% PVP, d) 6% PVP y e) 8% PVP, reportados por Sriani et al. (2024).62

Figura 35. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas con a) 0% PVP y b) 2% PVP reportadas por Sriani et al. (2024). 62

Figura 36. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) a la izquierda y M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm) a la derecha, en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k. 63

Figura 37. Gráficos de Flux vs Presión para analizar el efecto de la concentración de polímero. 64

Figura 38. Gráfico de Flux vs Presión para analizar el efecto del agente generador de poros. 65

Figura 39. Gráfico de Flux vs Presión para analizar el efecto del espesor. 65

Figura 40. Ángulos de contacto de membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18. 66

Figura 41. Ángulo de contacto de membranas de EPS con variación de concentración de PVP. .67

Figura 42. Ángulos de contacto reportados por A) Sriani et al. (2024) y B) Sureash et al. (2026) 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las procesos de membranas por diferencia de presión. 7

Tabla 2. Características de módulos de membranas. 8

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del poliestireno expandido (Ecotec, 2026). 12

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del D-Limoneno (Ravichandran et al., 2018). 13

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas TOTM (National Center for Biotechnology Information, 2026).....14

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas PVP (National Center for Biotechnology Information, 2026). 15

Tabla 7. Resumen de estudios relacionados a la investigación. 21

Tabla 8. Variables independientes y niveles del diseño experimental. 22

Tabla 9. Condiciones de diseño de las membranas. 22

Tabla 10. Grupos funcionales y longitud de onda esperado (Nakanishi, 1962). 28

Tabla 11. Resultados de análisis de compatibilidad según relación RED. 31

Tabla 12. Membranas fabricadas utilizando el método NIPS, sin soporte mecánico. 35

Tabla 13. Membranas fabricadas utilizando el método NIPS con soporte mecánico. 37

Tabla 14. Membranas seleccionadas para caracterizar. 49

Tabla 15. Resultados de porosidad y tamaño medio de poros de membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18. 64

Tabla 16. Porosidad y tamaño medio de poros reportados por estudios similares. 66

Tabla 17. Parámetros de solubilidad de Hansen. 78

1. INTRODUCCIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

A nivel mundial, el uso del agua ha aumentado y continúa creciendo a un ritmo de aproximadamente 1% anual. Gran parte de este incremento se atribuye a una combinación del crecimiento demográfico, desarrollo económico y cambios en los patrones de consumo. Debido a este aumento y a una disminución en la oferta del recurso, por baja en las lluvias y nieve, muchas partes del mundo se han visto afectadas por el estrés hídrico (Naciones Unidas, 2024). Según la ONU al año 2021, aproximadamente el 10% de la población mundial vivía en países con niveles altos y críticos de estrés hídrico (ONU-Agua, 2024). En lo que respecta a Chile, el país se encuentra afectado por una denominada macro sequía desde el año 2008, y a julio del 2025, existen 5 decretos vigentes que declaran zonas de escasez hídrica en 25,2 comunas del país, es decir, alrededor de un 7,3% de las comunas totales (DGA, 2025).

La situación mundial de escasez hídrica ha llevado a desarrollar nuevas tecnologías para obtener agua de fuentes no convencionales como la captación de aguas lluvia, reutilización de aguas residuales y la desalinización del agua de mar. Una de las tecnologías que ha experimentado un largo desarrollo y que se ha vuelto cada vez más importante, son las membranas, las cuales tuvieron sus primeras aplicaciones industriales significativas a principios de la década de 1960. Estas se definen como una barrera que separa dos fases y permite restringir el transporte de ciertos componentes de manera selectiva (Fane et al., 2011). Particularmente, en procesos de tratamiento de agua, la principal característica de las membranas es que deben ser permeables al agua, pero no a las sustancias que quieren ser rechazadas o removidas, de esta manera pueden ser utilizadas en diversas aplicaciones industriales que abarcan procesos como la purificación del agua, recuperación de aguas residuales, desalinización, entre otros (McGraw-Hill, 2012).

Actualmente en Chile según el último informe publicado por la Asociación Chilena de Desalación y Reúso (ACADES) a junio de 2025 existen 24 plantas desaladoras de agua de mar de tamaño industrial con una capacidad de producción superior a 20 L/s, que en total alcanzan una capacidad de producción de aproximadamente 10.500 L/s (ACADES, 2025). La región que más destaca es la de Antofagasta, que cuenta con 13 plantas, representando un 54% del total del país e incluyendo la planta más grande de América Latina, perteneciente a BHP, con una producción nominal instalada de 3.858 L/s, además de que el 85% del abastecimiento de agua para la región proviene de agua desalada y se sigue avanzando en proyectos para alcanzar el 100% (ACADES, 2024).

Sin embargo, la sostenibilidad de los procesos de fabricación y eliminación de las membranas utilizadas en ellos sigue siendo una gran preocupación. Generalmente se utilizan polímeros fósiles vírgenes como la polisulfona (PSU), fluoruro de polivinilideno (PVDF) polietersulfona (PES), entre otros, Junto con el uso de solventes orgánicos derivados del petróleo como la dimetilformamida (DMF), N-metil-2-pirrolidona (NMP) y dimetilacetamida (DMA), que son altamente inflamables, tóxicos, irritantes y con alto riesgo de generar un impacto negativo en la seguridad operativa, el medio ambiente y la salud humana, resultando en la generación de más de 50 mil millones de litros de aguas residuales anuales contaminadas con estos solventes. Por otro lado, la vida de una membrana de osmosis inversa (RO) o de nanofiltración (NF) varía entre los 3

y 7 años, tras los cuales suelen incineradas o desechadas en vertederos liberando una cantidad sustancial de CO_2 a la atmosfera. Por ello, es necesario reevaluar los procesos convencionales de fabricación para alinearlos con los principios de sostenibilidad y las obligaciones medioambientales (Loh et al., 2025).

Paralelamente, debido a múltiples procesos industriales y actividades cotidianas, se generan todos los días una gran cantidad de residuos poliméricos, los cuales aumentan en correlación directa con la demanda de productos, derivada del crecimiento demográfico. Algunos ejemplos de estos residuos provienen del poliestireno expandido (uso en contenedores de alimentos y empaques de transporte), el tereftalato de polietileno (uso en fabricación de botellas, cosméticos, artículos electrónicos, entre otros), el cloruro de polivinilo (uso en tuberías, cables, repuestos de automóviles, etc) y la celulosa y sus derivados (colillas de cigarros, papel usado, etc) (Khanzada et al., 2024).

Debido al impacto que generan estos residuos, es necesario adoptar procesos sostenibles para la fabricación de membranas, que minimicen las emisiones nocivas y reduzcan la contaminación del medio ambiente. Para alcanzar la sostenibilidad, se coloca un gran énfasis en la gestión de residuos y la evaluación de ciclo de vida de los productos que fundamentan los principios básicos de una economía circular. En la Figura 1 se presentan estrategias que se han propuesto y estudiado en las últimas décadas, como alternativas a las materias primas convencionales en la fabricación de membranas. (polímeros fósiles y solventes tóxicos). Estas estrategias incluyen el uso de biopolímeros, lo cuales son derivados de fuentes naturales como microorganismos, plantas o animales, y están compuestos por monómeros biodegradables y renovables. El uso de aditivos naturales como arcillas, celulosa, bio-carbón o nanopartículas obtenidas a partir de extractos de hojas, que presentan una naturaleza hidrofílica (Naeem et al., 2024).



Figura 1. Materiales alternativos para membranas sustentables y verdes (Naeem et al., 2024).

Por otro lado, debido al riesgo que implica el uso de solventes tradicionales, en los últimos años se ha estudiado la posibilidad de reemplazarlos por solventes verdes o no tóxicos, ya que tienen un bajo impacto en la salud humana y el medio ambiente. Recientemente se han investigado distintos

solventes verdes para la fabricación de membranas, incluyendo el lactato metílico, trietilfosfato, d-limoneno, Rhodiasolv PolarClean, Cyrene, TOTM entre otros (Dong et al., 2021).

Como última estrategia, el reciclaje de polímeros desechados representa una vía potencial para el desarrollo de membranas rentables y sostenibles que presentan propiedades comparables o superiores a aquellas fabricadas con materiales de primer uso.

Una de las formas de fomentar el reciclaje de polímeros, es aplicar el concepto de economía circular, para eliminar residuos desde la etapa de diseño, en donde los productos y materiales, se aprovechan el mayor tiempo posible o incluso de manera indefinida y además aplicando un enfoque conservativo, donde se busca activamente la regeneración del capital natural y la biodiversidad. Ambos esquemas se pueden observar en la Figura 2 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

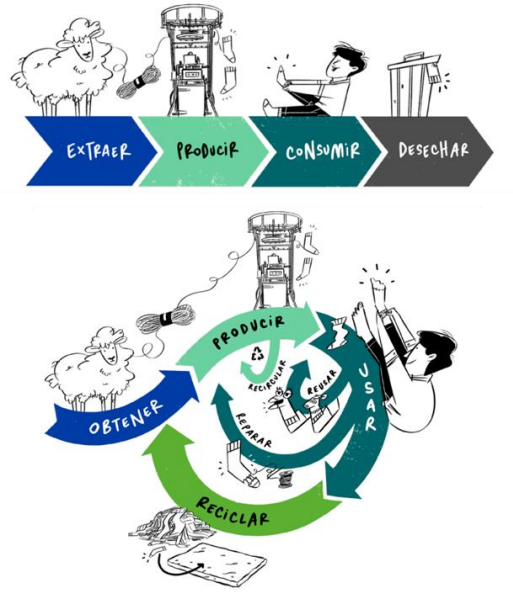


Figura 2. Esquema de economía lineal y circular (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

El año 2016 en Chile se publicó la Ley N° 20.920, Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP), la cual establece que los productores de productos prioritarios están obligados a organizar y financiar la gestión de los residuos que esos productos generaran al final de su vida útil. Esta Ley dio un impulso a la economía circular en el país, junto con otros factores como la sensibilidad medioambiental, activando una serie de organizaciones que están empujando la transformación (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

Es por ello que, en el 2019, el Ministerio del Medio Ambiente inició el proceso de desarrollo de la "Hoja de ruta para un Chile circular al 2024", que es un plan estratégico que tiene un horizonte de 20 años y cuyo objetivo es acelerar la transición a nivel nacional. Para evaluar los avances, se plantean una serie de 7 metas, en donde la 5ª habla sobre el aumento del reciclaje. Al año 2018 la tasa general de reciclaje fue de aproximadamente un 13%, quedando muy atrás en comparación con países de vanguardia como Holanda, Bélgica y Eslovenia que alcanzaron tasas de 72%, 78%

y 80% respectivamente. Es por esto, que la quinta meta plantea alcanzar una tasa del 40% al año 2030 y aumentar a una tasa de 75% al año 2040 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

De esta manera, el aumento en la demanda de membranas para el tratamiento de agua, el fomento de la economía circular en el país y el cumplimiento de las metas establecidas por la Ley REP, es que se crea la oportunidad de utilizar polímeros en desuso, para la fabricación de membranas.

A pesar de que hoy en día se encuentra una amplia variedad de estudios respecto a la fabricación sostenible de membranas, gran parte de ellos se centran en solucionar solo una parte del problema, ya sea, empleando solventes verdes, en reemplazo de los tradicionales, pero utilizando polímeros vírgenes o de primer uso, o utilizando polímeros reciclados, fomentando el reciclaje y la economía circular, pero manteniendo los solventes tóxicos. Es por esto, que se requiere investigar la posibilidad de combinar ambas soluciones, el uso de solventes verdes y polímeros reciclados, como solución a los procesos de fabricación tradicionales.

En base a los antecedentes, se desarrolló este estudio en donde se investiga la fabricación de membranas con poliestireno expandido reciclado como polímero, d-limoneno como solvente, un nuevo solvente llamado TOTM y nuevas condiciones de diseño, por lo que se plantea la siguiente pregunta de investigación.

1.1. Pregunta de investigación

¿Cuáles son las condiciones de diseño que potencian las propiedades fisicoquímicas de las membranas fabricadas a partir de poliestireno expandido reciclado y como solventes d-limoneno y TOTM, que permiten maximizar su rendimiento?

1.2. Hipótesis

Es posible fabricar membranas a partir de poliestireno expandido y de los solventes: d-limoneno y TOTM, empleando nuevas condiciones de diseño y operación, que potencien sus propiedades fisicoquímicas y maximizan su rendimiento.

1.3. Objetivo general

Desarrollar membranas filtrantes a partir de poliestireno expandido reciclado y solventes verdes para su aplicación en el tratamiento de aguas, como alternativa a los métodos convencionales de producción, evaluando su desempeño bajo diferentes condiciones de diseño y operación a nivel de laboratorio.

1.4. Objetivos específicos

I. Evaluar las condiciones de diseño que permitan fabricar membranas viables y funcionales.

II. Evaluar el desempeño de las membranas bajo distintas condiciones de operación, en términos de permeabilidad, rechazo de sales y disminución de turbidez.

III. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y morfológicas de las membranas con mejor desempeño, para su clasificación y proyección de uso a gran escala.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Membranas

Las membranas se pueden definir como una barrera sólida semipermeable, situada entre dos fases, que restringe el transporte de uno o más componentes de manera selectiva (Mulder, 1991). En estos procesos, la alimentación se divide en dos corrientes: el permeado y el rechazo (o retenido). El primero corresponde a la fracción que atraviesa la membrana, caracterizada por una baja o nula concentración de solutos retenidos. Por el contrario, el rechazo es el flujo que no traspasa la barrera y concentra la mayor parte de los componentes separados. Dependiendo del objetivo de la separación, cualquiera de estas corrientes puede ser considerada el producto final. En la Figura 3, se presenta un esquema general del proceso:

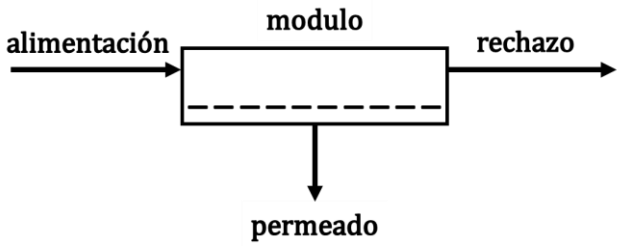


Figura 3. Esquema general del proceso de membrana (Mulder, 1991).

Las membranas se pueden clasificar según diferentes categorías, que nos permiten entender mejor su estructura y funcionamiento, siendo la más general la naturaleza de la membrana, encontrando biológicas y sintéticas, estas últimas las de interés para esta investigación. Las membranas sintéticas se clasifican principalmente según fuerza impulsora, configuración y geometría, material y morfología y métodos de fabricación.

2.1.1. Fuerza impulsora

Para que una molécula o partícula sea transportada a través de una membrana, debe existir una fuerza externa que actúe sobre ella. Esta se denomina fuerza impulsora y es producto de un gradiente de potencial, que surge como resultado de una diferencia de presión, temperatura, concentración o de potencial eléctrico en el sistema, siendo la presión la más común en procesos de tratamiento de agua (Mulder, 1991).

2.1.1.1. Diferencia de temperatura

El proceso de separación inducido térmicamente ocurre gracias a una diferencia de temperatura entre dos fases, que genera un flujo de calor y de masa. El más común es el proceso de destilación por membrana, donde la diferencia de temperatura entre dos líquidos o soluciones genera una diferencia de presión de vapor, provocando que las moléculas de vapor se transporten a través de la membrana porosa desde el lado de mayor presión hacia el lado de menor presión. En este proceso la membrana solo actúa como barrera, por lo que debe ser hidrofóbica y no humectable para que las partículas de vapor no queden retenidas en los poros. En comparación a otros procesos de separación por membranas este presenta ventajas como: presión de operación más baja, rechazo del 100% (teórico) de iones inorgánicos y compuestos no volátiles y uso de energía proveniente de fuentes renovables, sin embargo, su aplicación a gran escala presenta aún muchos retos debido al

alto consumo energético que se requiere para calentar la corriente de alimentación, al alto ensuciamiento de la superficie y la perdida de calor por conducción. Algunas de sus aplicaciones son: desalinización de agua de mar, concentración de jugos, eliminación de metales pesados de aguas residuales, entre otros (Wang & Chung, 2015).

2.1.1.2. Diferencia de concentración

En cuanto a los procesos de separación que utilizan la diferencia de concentración como fuerza impulsora se encuentran la pervaporación, la diálisis y la separación de gases, en donde el más común y conocido es la diálisis, donde pequeñas partículas son separadas de moléculas más grandes gracias a la difusión a través de una membrana semipermeable. Este es un proceso espontáneo que genera un incremento en la entropía y una disminución de la energía libre de Gibbs, por lo que es termodinámicamente favorable. En comparación a otro procesos presenta ventajas al ser altamente eficiente en la purificación de agua residual, por un bajo consumo energético y por no generar contaminación al medio ambiente (Luo et al., 2011).

2.1.1.3. Diferencia de potencial eléctrico

Los procesos de membranas en donde la diferencia de voltaje o potencial eléctrico actúa como fuerza impulsora, aprovechan la capacidad de los iones o moléculas cargadas para conducir una corriente eléctrica, en donde las moléculas sin carga no se ven afectadas, lo que permite que los componentes cargados eléctricamente puedan ser separados migrando a través de la membrana, usualmente varios procesos combinan una diferencia de voltaje y el uso de membranas cargadas eléctricamente. El proceso más conocido se conoce como electrodiálisis, en donde membranas cargadas eléctricamente son utilizadas para remover iones de soluciones acuosas. Para ello se utiliza un arreglo de membranas de intercambio catiónico y aniónico que se disponen de manera alterna entre un cátodo y un ánodo, de manera que cuando se alimenta una solución iónica las particular cargadas positivamente migran al cátodo y las negativas al ánodo. Algunas de las aplicaciones de este proceso son en la desalinización del agua, la separación de aminoácidos, entre otros (Mulder, 1991).

2.1.1.4. Diferencia de presión

Por último, los procesos de membranas impulsados por diferencia de presión son los más aplicados tanto en tratamiento de aguas como en otras industrias, abarcando desde el pretratamiento hasta el postratamiento. Estos procesos se basan en la presión hidráulica para lograr la separación, existen cuatro tipos principales que son: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y Osmosis inversa (OI), que se diferencian según su requerimiento de presión, el tamaño de poros de la membrana y el tipo de contaminantes que logran retener. En la Tabla 1 se presentan las características de estos procesos (Ezugbe & Rathilal, 2020; Fane et al., 2011).

Tabla 1. Características de los procesos de membranas por diferencia de presión.

Proceso	Tamaño de poros, nm	Presión requerida, bar	Permeabilidad promedio, $L/m^2h \cdot bar$	Tipo de membrana	Solutos retenidos
MF	100-10^3	≤ 2	500	Porosa, asimétrica o simétrica	Virus, bacterias, aceites y partículas suspendidas
UF	10-100	1-10	150	Micro porosa, asimétrica	Macromoléculas, coloides, proteínas, aceites
NF	1-10	5-15	10-20	*TFC**, asimétrica	Tintes, sales multivalentes, sulfatos
OI	≤ 1	10-75	5-10	Semi porosa, asimétrica, *TFC**	Iones monovalentes

TFC = Thin film composite o película delgada compuesta*

2.1.2. Materiales y morfología

Las membranas pueden ser fabricadas a partir de una gran variedad de materiales, sin embargo, estos se agrupan en dos grandes categorías, orgánicos (polímeros) e inorgánicos. Dentro de los inorgánicos generalmente se encuentran cerámicas, vidrios, metales y carbón, mientras que en los orgánicos generalmente se encuentran los polímeros o macroestructuras. Las membranas poliméricas se puedan clasificar según su morfología o estructura en isotrópicas y anisotrópicas. Las membranas isotrópicas se caracterizan por presentar una composición uniforme a lo largo de toda su estructura y estas pueden ser densas o porosas. Por otro lado, las membranas anisotrópicas o asimétricas se componen de varias capas en las que la porosidad, el tamaño de poros e incluso la composición cambian, generalmente presentan una capa selectiva superficial relativamente densa y delgada, sobre capas de soporte micro porosas que entregan resistencia mecánica y estabilidad a la estructura. Estas a su vez se clasifican en 3 categorías: membranas asimétricas integrales que son fabricadas a partir de un solo material, membranas compuestas que contienen dos capas separadas donde cada una cumple una función diferente, y membranas liquidas soportadas, que se componen de un líquido retenido por fuerzas capilares en la matriz de un soporte solido micro poroso (Baker, 2012; Ren & Wang, 2011).

Actualmente, las membranas comerciales se fabrican principalmente a partir de polímeros, ya que son materiales química y térmicamente estables en un amplio rango de pH y temperatura, además de presentar una buena resistencia mecánica. Dentro de estos se incluyen algunos como la celulosa, acetatos de celulosa (CA), poliamidas (PA), polipropileno (PP), poliacrilonitrilo (PAN), alcohol polivinílico (PVA), polisulfona (PSU), polietersulfona (PES) policloruro de vinilo (PVC), polieterimida (PEI), policarbonato (PC), poliuretanos, fluoruro de poli vinilideno (PVDF), entre otros (Ren & Wang, 2011).

Además de la estructura microporosa de la membrana, estas se pueden clasificar en dos estructuras macroscópicas o formas: planas y tubulares. Las membranas planas son láminas largas, formadas sobre placas de vidrio o de metal, usualmente con un espesor alrededor de los 100 µm, el flujo de alimentación pasa a través de la lámina de manera perpendicular. Por otro lado, las tubulares son estructuras porosas en forma de tubo con diámetros que varían desde los 0,5-5 mm, en donde la membrana es la pared del tubo, por lo que el flujo de alimentación pasa por el centro del tubo (Mulder, 1991).

2.1.3. Configuración y geometría

En los procesos de membranas a nivel industrial se suele requerir de cientos a miles de metros cuadrados de área activa para llevar a cabo la separación. Una solución práctica a esta limitación es empacar las membranas en pequeñas unidades llamadas módulos. Estos se suelen encontrar como placas y coraza, tubulares, espiral y fibra hueca, en la (Ezugbe & Rathilal, 2020; Mulder, 1991). En la Tabla 2 se presentan distintas características de estos módulos

Tabla 2. Características de módulos de membranas (Ezugbe & Rathilal, 2020; Mulder, 1991).

Propiedad	Placa y coraza	Tubular	Espiral	Fibra hueca
Densidad de empaque, m^2/m^3	30-500	30-200	300-1000	600-1200
Potencial de ensuciamiento	Medio	Bajo	Alto	Muy alto
Facilidad de limpieza	Media	Alta	Baja	Muy baja
Costo de operación	Alto	Alto	Medio	Bajo
Aplicaciones industriales	Electrodiálisis, pervaporación	Farmacéutica, alimentos, efluentes de petroquímicas	Desalinización de agua de mar, concentrado de leche o jugos	Aguas residuales, farmacéutica, pretratamiento de desalinizadoras

2.1.4. Método de fabricación

Existen diversas técnicas para la fabricación de membranas, sin embargo, el tipo de método que se utiliza depende principalmente del material y de la estructura que se desea obtener. En el caso de las membranas poliméricas, su fabricación se ve influenciada por un proceso multiescala controlado por diferentes aspectos como la cinética de formación de fases, la diferencia de potencial termodinámico y la velocidad de transferencia de masa. Algunos de los métodos aplicados que promueven la mejora de las propiedades fisicoquímicas de las membranas son la polimerización interfacial, el *electrospinning*, la sinterización, el estiramiento y la inversión de fases, siendo este último el más popular y utilizado, especialmente en la producción de membranas comerciales gracias a su versatilidad y rentabilidad. (Sahu et al., 2024).

El método de separación de fases consiste fundamentalmente en la alteración o desestabilización de una solución polimérica homogénea (*dope/casting solution* en inglés), obligándola a separarse

en dos fases, una rica en polímero que forma la matriz sólida de la membrana y otra rica en solvente o pobre en polímero que forma los poros. Según los parámetros de control para lograr la separación, se pueden clasificar en 4 técnicas diferentes llamadas: separación de fases inducida por vapor (VIPS), separación de fases inducida por un no-solvente (NIPS) o precipitación por inmersión, separación de fases inducida por evaporación (EIPS) y separación de fases inducida por temperatura (TIPS) (Abdelrady et al., 2026).

En el marco de esta investigación, nos centraremos en la técnica de separación de fases inducida por un no solvente (NIPS). En esta técnica un polímero o mezcla de polímeros se disuelve en al menos un solvente para formar una solución homogénea; aditivos o generadores de poro también se agregan a la solución. La solución se deposita en forma de película sobre un sustrato, generalmente una placa de vidrio o un sustrato polimérico, para formar una lámina con ayuda de un aplicador de película. La lámina es sumergida en un baño de coagulación del no solvente, usualmente agua, y es en esta etapa que ocurre el intercambio de fases, donde el solvente, presente en la lámina, y el no-solvente se difunden a través de la interfaz, seguida de la solidificación del polímero (precipitación). Como resultado se forma una membrana polimérica asimétrica con una capa superior selectiva densa y subcapas de soporte porosas (Dong et al., 2021).

A pesar de que este método es utilizado ampliamente, es importante considerar la correcta selección y manipulación de las variables involucradas en el proceso, ya que estas influencian directamente en las características de la membrana obtenida como producto final. Algunas de estas son, el contenido de polímero, el uso de un solvente compatible que logre formar una solución homogénea, la cantidad y tipo de aditivo en caso de ser utilizado, la selección de un no-solvente que sea miscible con el solvente para un correcto intercambio de fases, el tiempo del baño de coagulación y condiciones como la humedad y temperatura (Abdelrady et al., 2026)

2.1.5. Ecuaciones de diseño

En un sistema de membranas existen principios básicos respecto a su diseño y funcionamiento, que son aplicados de manera general a todos los sistemas de filtración por membranas que utilizan presión como fuerza impulsora (MF, UF; NF y OI). Los más importante son el balance general, el flux y la recuperación. El balance general se representa por la ecuación 1 (Shammas & Wang, 2011):

$$Q_f = Q_c + Q_p \tag{1}$$

Donde Q_f , Q_c y Q_p corresponden al flujo de alimentación, de rechazo y de permeado respectivamente, en L/h.

Por otro lado, la productividad de un sistema de membranas es caracterizado generalmente por el flux, que se define como el flujo filtrado por unidad de área activa de la membrana, como se presenta en la ecuación 2 (Shammas & Wang, 2011)

$$J = \frac{Q_p}{A_m} \tag{2}$$

Donde J es el flux en L/m^2h y A_m corresponde al área activa de la membrana en m^2.

Por último, el porcentaje de recuperación que mide la cantidad de permeado que se obtiene a partir del flujo de alimentación, se obtiene a partir de la ecuación 3 expresado en porcentaje (Shammas & Wang, 2011)

$$\mathrm{R} = \frac{\mathrm{Q_p}}{\mathrm{Q_f}} \cdot 100 \tag{3}$$

Donde R corresponde a la recuperación en porcentaje decimal.

2.2. Parámetros de solubilidad de Hansen

A pesar de que actualmente existe una amplia gama de solventes verdes que vienen a reemplazar los convencionales, es necesario evaluar la afinidad polímero-solvente. Esto es crucial en los primeros pasos de la fabricación de membranas, ya que influye en la fase de separación y puede traer consecuencias en su rendimiento. Los parámetros de solubilidad de Hansen (HSP) sirven como una herramienta para evaluar la afinidad entre polímeros y solventes, ya que considera las fuerzas de interacción molecular involucradas. El parámetro de solubilidad total o parámetro de solubilidad de Hildebrand (δ) se calcula según la ecuación 4 (Sing Soh et al., 2023):

$$\delta^2 = \delta_\mathrm{d}^2 + \delta_\mathrm{p}^2 + \delta_\mathrm{h}^2 \tag{4}$$

Donde δ_d, δ_p y δ_h representan las contribuciones de las fuerzas de dispersión, interacciones polares y los enlaces de hidrógeno respectivamente, expresados en $\mathrm{MPa}^{0,5}$.

La compatibilidad entre un solvente y un polímero puede ser evaluada en base a su distancia en el espacio de Hansen, comúnmente referida como distancia HPS, $\mathrm{R_a}$ se expresa como (Sing Soh et al., 2023):

$$R_a^2 = 4(\delta_{d1} - \delta_{d2})^2 + \left(\delta_{p1} - \delta_{p2}\right)^2 + (\delta_{h1} - \delta_{h2})^2 \tag{5}$$

Donde δ_{d1}, δ_{p1} y δ_{h1} corresponden a los parámetro de solubilidad parciales del solvente, mientras que δ_{d2}, δ_{p2} y δ_{h2} son los parámetro de solubilidad parciales del polímero, en $\mathrm{MPa}^{0,5}$.

Para entender mejor la ubicación relativa de un solvente respecto al espacio de solubilidad de un polímero especifico, se calcula la diferencia de energía relativa (RED) mediante la siguiente ecuación:

$$\mathrm{RED} = \frac{\mathrm{R_a}}{\mathrm{R_0}} \tag{6}$$

Donde R_0 es el radio de una esfera de polímero.

Un valor RED de 0 corresponde a una diferencia de energía nula, valores inferiores a 1 indican una alta afinidad, un valor igual o cercano a 1 corresponde a una condición límite y valores mayores a 1 indican menor afinidad (Hansen, 2007).

2.3. Polímeros

El aumento progresivo de la producción de plásticos y la producción acumulada desde 1950, combinado con que menos del 10% del plástico es reciclado, significa que en un futuro cercano tendremos alrededor de 26 millones de toneladas de desechos plásticos conviviendo con el ser

humano y medio ambiente. El principal uso de los plásticos se encuentra en envases y embalajes utilizados tanto en producción nacional como en exportaciones (Huhn-Ibarra et al., 2025).

Durante el año 2024 se estima que entraron alrededor de 1,96 millones de toneladas de envases y embalajes al mercado chileno, de los cuales un 67% formó parte de algún sistema de gestión y solo un 33% fue efectivamente valorizado. Dentro de ello se destaca el cartón como el material con mayor volumen y tasa de valorización (48,9%) mientras que el vidrio y PET presentan tasas de 22,4% y 23,3% respectivamente (Kilklos, 2025).

Los plásticos utilizados para la producción de envases y embalajes son el Tereftalato de polietileno (PET o PETE), Polietileno de alta densidad (HDPE o PEHD), Cloruro de polivinilo (PVC o V), Polietileno de baja densidad (LDPE o PELD), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) y otros plásticos. En Chile se consumen varios tipos de plásticos entre los cuales encontramos el PET (59,2%), el PE (19,9%), PP (7,2%), PS (5,6%), PVC (0,4%) y otros (7,7%) (Pacto Chileno de los Plásticos, 2024).

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno, este se puede encontrar de diversas formas siendo las más comunes las listadas a continuación (Capricho et al., 2022).

1. Poliestireno cristalino o poliestireno de uso general (GPPS): se sintetiza mediante la técnica de polimerización en masa y se considera como poliestireno no modificado, generalmente se utiliza en procesos de moldeo por inyección en la fabricación de componentes médicos y material de laboratorio como conectores para jeringas, placas Petri, entre otros.
2. Poliestireno de alto impacto (HIPS): se obtiene al añadir caucho en el proceso de polimerización, con el fin de mejorar la resistencia mecánica del material, volviéndolo menos quebradizo y capaz de soportar impactos sin romperse. Suele utilizarse en la producción de empaques de comida como botellas, envases de yogur, entre otros, pero también se puede emplear en la fabricación de juguetes, equipos audiovisuales y dispositivos médicos.
3. Poliestireno extruido (XPS): es una espuma rígida, que se obtiene al fundir poliestireno en un extrusor y luego inyectar un agente espumante formando una espuma continua que se corta en planchas. Dentro de la variedad de espumas rígidas, presenta el menor factor R y la mejor relación costo-eficiencia, lo que permite su uso en distintas áreas como la industria frigorífica o en la construcción en forma de paneles rígidos de aislamiento estructural (SIP).
4. Poliestireno orientado (OPS): se obtiene al estirar en caliente láminas de GPPS de alto peso molecular en dirección longitudinal y transversal (orientación biaxial), alineando las cadenas poliméricas, aumentando la resistencia al desgarro y la rigidez de la lámina. Se utiliza en la fabricación de envolturas retractiles o envases tipo *clamshell* para almacenar alimentos como ensaladas, postres y productos de panadería.
5. Poliestireno expandido (EPS): se produce a partir de la mezcla de un agente espumante gaseoso, como el pentano o los clorofluorocarbonos, con esferas o pequeñas perlas de poliestireno. La expansión se genera por la aplicación de calor, usualmente vapor, provocando que el agente expansor forme células gaseosas que inflan la estructura, obteniendo perlas de baja densidad

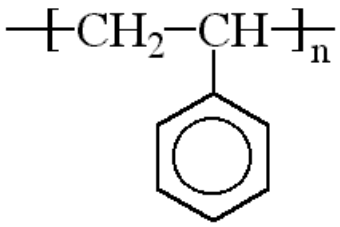
compuesto por un 5% de polímero y un 95% de aire. Este, se puede almacenar en forma de perlas o realizar un proceso de moldeo, aplicando temperatura y presión, formando bloques de espuma.

2.3.1. Poliestireno expandido

Algunas de sus aplicaciones más comunes son la producción de vajilla desechable (platos, vasos, bandejas, etc), material de embalaje gracias a su buena capacidad de adsorción de choques, material de laboratorio, recipientes térmicos para almacenar alimentos, entre otros. Al ser un polímero de un solo uso, su consumo ha aumentado no solo por su simplicidad y bajo costo, sino también por el crecimiento global de la población que conlleva a una mayor demanda y generación de residuos.

Los desechos de EPS representan un gran riesgo para el medio ambiente y la salud tanto de la fauna silvestre como de los seres humanos. Debido a su baja densidad, se dispersa fácilmente con el viento, contaminando diversos ecosistemas y llegando incluso a zonas remotas. Además, al no ser biodegradable, persiste en el medio ambiente durante cientos de años, fragmentándose gradualmente en piezas más pequeñas que la fauna suele confundir con alimento. En conjunto con estos factores, debido a su estructura ligera y de gran volumen, su reciclaje se dificulta; a esto se suma la ineficiencia del reciclaje químico, lo que resulta en altos costos para su procesamiento (Huhn-Ibarra et al., 2025). En la Tabla 3 se presentan sus propiedades fisicoquímicas.

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas del poliestireno expandido (Ecotec, 2026).

Formula	$(C_8H_8)n$
Estructura	
Densidad aparente	0,02-0,03 g/cm^3
Conductividad térmica	0,03-0,038 W/mK a 10°C
Estado físico	Sólido, como perlas o planchas
Resistencia química	Estable frente a soluciones salinas, soluciones jabonosas, ácidos diluidos, soda cáustica, alcoholes, aceites. Inestable frente a solventes orgánicos como acetona, combustibles para motores y ácidos anhidros
Resistencia al fuego	Inflamable
Resistencia térmica	Soporta temperaturas criogénicas (-100°C) y mayores a 100°C, pero si se mantiene alta temperatura por un periodo largo comienza a ablandarse

2.4. Solventes verdes

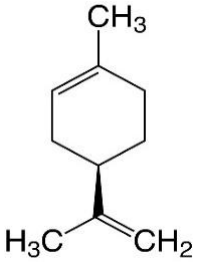
Los solventes verdes se consideran como alternativas ecológicas a los solventes petroquímicos tradicionales, caracterizados por presentar mejores propiedades medioambientales, sanitarias y de seguridad, como una mayor biodegradabilidad, menor emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC), menor huella de carbono, menos consumo de energía en su producción, provienen de fuentes renovables, pueden ser recuperados y reutilizados y no son tóxicos para el ser humano y el medio ambiente (Naeem et al., 2024).

Debido al interés que han generado en los últimos años actualmente se pueden encontrar varias alternativas de solventes verdes derivados de diversas fuentes como fluidos supercríticos o subcríticos, solventes a base de esteres (Citrato de trietilo (TEC), γ-Butirolactona (GBL), Lactato de etilo, Lactato de metilo, PolarClean y Trioctil trimelitato (TOTM)), derivados de la celulosa y el almidón (γ-Valerolactona (GVL), Cyrene, 2-Metil Tetrahidrofurano (2-MeTHF)) y derivados de fuentes renovables como los desechos de industrias frutícolas, cultivos energéticos y biomasas acuáticas (glicerol, D-limoneno, ácido láctico, a-pineno, etc) entre otros (Zou et al., 2021). En esta investigación se utilizaron 2 solventes verdes: D-limoneno y TOTM.

2.4.1. D-limoneno

El limoneno, también conocido como dipenteno, es un mono terpeno monocíclico natural, que presenta dos isómeros ópticos, D (+) limoneno y L (-) limoneno, además de una mezcla racémica (DL-limoneno), debido a las diferencias en su estructura cada una presenta una bioactividad única debido a la afinidad de los distintos sitios activos. El D-limoneno se encuentra ampliamente en los aceites esenciales de cascaras de cítricos, como la naranja y el limón, por lo que se obtiene como subproducto de desechos de la industria frutícola, proviniendo así de una fuente renovable. Según el *U.S. Food and Drug administration* es clasificado como un compuesto "generalmente reconocido como seguro" o GRAS según sus siglas en inglés, que se utiliza en la industria cosmética y de alimentos, además, de contar con propiedades analgésicas, antiinflamatorias, antioxidantes, antimicrobianas y neuroprotectoras (Lin et al., 2024). En la Tabla 4 se presentan sus propiedades fisicoquímicas.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del D-Limoneno (Ravichandran et al., 2018).

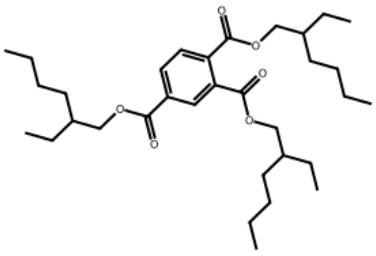
Formula	$C_{10}H_{16}$
Estructura química	
No. CAS	5989-27-5
Masa molar	136,23 g/mol
Estado físico	Aceite incoloro

Punto de fusión	-74°C
Punto de ebullición	178°C
Punto de inflamabilidad	48°C
Solubilidad	Poco soluble en agua (13,8 mg/ml a 25°C), miscible en etanol.
Densidad	0,8411 g/cm^3 a 20°C
Disponibilidad comercial	Grado técnico (97% de pureza)

2.4.2. Trioctil trimelitato

El TOTM es un tipo de éster trimelitado producido a través de la esterificación de anhidrido trimélico con 2-etilhexano. Generalmente se utiliza como plastificante, reemplazando al Dioctil Ftalato (DOP) en la producción de productos de PVC. Se caracteriza por presentar una alta resistencia al calor, baja volatilidad y alta resistencia a la extracción por solventes, permitiendo la exposición prolongada a altas temperaturas y productos químicos, conservando sus propiedades mecánicas y físicas (Liu et al., 2020). En la Tabla 5 se detallan sus propiedades fisicoquímicas:

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas TOTM (National Center for Biotechnology Information, 2026).

Formula	$C_{33}H_{54}O_6$
Estructura química	
No. CAS	3319-31-1
Masa molar	546,78 g/mol
Estado físico	Aceite incoloro
Punto de fusión	-46°C
Punto de ebullición	414°C
Punto de inflamabilidad	263°C
Solubilidad	< 1 mg/ml a 20°C
Densidad	0,988 g/cm^3 a 20°C
Disponibilidad comercial	Grado técnico (99% de pureza)

2.5. Generador de poros

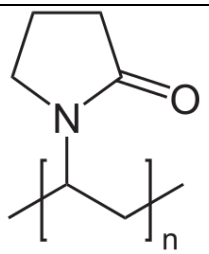
En el proceso de fabricación de membranas actúa como agente generador de poros, especialmente en las que se obtienen mediante el método de inversión de fases (NIPS), ya que al ser soluble en agua genera un intercambio instantáneo entre el solvente y no solvente, mejorando el tamaño y

distribución de poros, e incrementando las propiedades hidrofílicas y difusivas de la membrana (Cardoso et al., 2024).

La estructura y morfología de las membranas pueden ser modificadas ajustando factores como la temperatura del proceso, el tiempo de evaporación del solvente, el proceso de fabricación y la composición de la solución (polímero, solventes y/o aditivos). Algunos de los aditivos empleados son el agua, polietilenglicol (PEG), sales y polivinilpirrolidona (PVP) (Cardoso et al., 2024).

La polivinil pirrolidona (PVP) es un polvo ligero soluble en agua, escamoso e higroscópico, es decir, que absorbe fácilmente el agua presente en el ambiente, que se utiliza como aditivo en productos farmacéuticos, cosméticos y alimenticios, gracias a sus propiedades espesantes, estabilizantes e inhibidoras de la recristalización (Kariduraganavar et al., 2014). En la Tabla 6 se presentan sus propiedades fisicoquímicas

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas PVP (National Center for Biotechnology Information, 2026).

Formula	$(C_6H_9NO)_n$
Estructura química	
No. CAS	9003-39-8
Masa molar	111,14 g/mol
Estado físico	Polvo ligero
Punto de fusión	13°C
Punto de ebullición	96°C
Punto de inflamabilidad	95°C
Solubilidad	En agua 100 mg/L 20°C
Densidad	1,04 g/cm^3 a 20°C
Disponibilidad comercial	MQ200

2.6. Soporte mecánico

El diseño de membranas se centra generalmente en obtener membranas altamente selectivas y permeables, para lograr este objetivo el espesor de la capa activa suele ser menor a 1 μm en el caso de membranas utilizadas en la desalinización. No obstante, debido al bajo espesor estas tienden a ser frágiles y difíciles de manipular por lo que se requiere aplicar una o varias capas de soportes porosos que aporten resistencia mecánica a la estructura y permitan aplicar una mayor presión durante el proceso sin que sufran daños estructurales (Pinnau & Freeman, 2000).

Una membrana compuesta de multicapas consta de un soporte poroso y varias capas selectivas las cuales se aplican mediante diferentes métodos como el recubrimiento por solución, polimerización

interfacial, entre otros. Algunas de las ventajas que ofrecen las membranas compuestas son la independencia para la selección de los materiales del soporte mecánico y de la capa activa, la independencia de preparación de ambas capas y el control del espesor de la capa activa. Para una correcta selección del soporte poroso este debe ser químicamente resistente a el o los solventes utilizados para formar la solución homogénea que forma la capa activa, presentar una alta porosidad superficial para no crear resistencia en la transferencia de masa del proceso y un tamaño de poro reducido para que la solución no penetre en la estructura del soporte y se forme correctamente la capa en la superficie (Pinnau & Freeman, 2000).

Existen diversos materiales que pueden ser utilizados como soporte poroso además de diversas técnicas de fabricación dentro de las cuales encontramos estructuras laminares a partir de grafeno, estructuras de armazón compuestas de zeolitas o metales orgánicos (COF/MOF) y estructuras de red a partir de distintos polímeros como telas tejidas de poliéster o polipropileno (Zhang et al., 2022).

2.6.1. Tela no tejida

La tela no tejida (*non-woven fabric*) es una tela formada por una estructura de fibras densas y porosas, que se produce a partir de materiales textiles ya sea en forma de fibras o polímeros y en los últimos años también se han utilizado materiales reciclados, evitando el uso de materias primas vírgenes (Alves et al., 2024).

En el caso de fabricación de membranas la tela no tejida se utiliza como capa de soporte porosa actuando como la columna vertebral de la estructura. Una tela no tejida porosa y con la humectabilidad adecuada ayuda a distribuir la capa polimérica de manera uniforme durante el proceso de inversión de fases, lo que permite la formación de una capa activa más uniforme e interconectada (Korkut et al., 2026). En la Figura 4 se presenta la tela utilizada en el estudio.

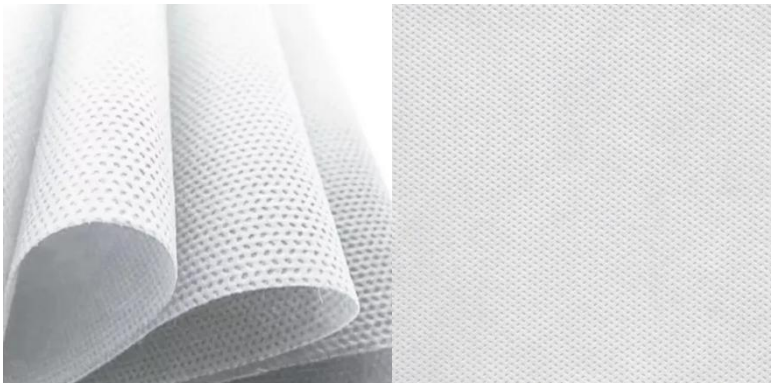


Figura 4. Tela no tejida de poliéster comercial (Meriggi, 2026).

3. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años los estudios sobre el desarrollo de membranas sustentables han ido en aumento, debido a la necesidad de disponer de alternativas a los procesos convencionales de fabricación. Sin embargo, estos abordan de manera parcial el problema, algunos se centran en el uso de polímeros reciclados, impulsando la economía circular, pero recurren al uso de solventes tóxicos; otros emplean solventes verdes, pero con polímeros vírgenes. Para determinar los avancen en el desarrollo de estas membranas, se utilizó la base de datos principal de *Web of Science* (WoS), implementando una estrategia de búsqueda en los campos de título, resumen y palabras clave, estructurada mediante operadores booleanos. Las estrategias combinaron tópicos asociados al poliestireno expandido reciclado, solventes verdes, aditivos y soportes mecánicos, además de métodos de fabricación, caracterización de las membranas y estudios de rendimiento. La búsqueda se acotó a artículos de investigación publicados en los últimos años (2026-2020) que incluyeran al menos uno de los materiales utilizados en esta investigación, con el fin de asegurar vigencia y relevancia técnica del estudio.

Uno de los estudios más recientes, publicado por Santana-Luna et al. (2025), consistió en la fabricación de membranas a partir de EPS reciclado, recolectado de empaques de quipos electrónicos en desuso, utilizando Dimetil Isosorbida (DMI) como solvente verde y Trimetilsilil clorosulfonato (TMSCIS) en 1,2-dicloroetano (DCE) como agente sulfonante para aumentar la polaridad del polímero. Las membranas fueron elaboradas mediante el método NIPS, para ello se prepararon soluciones de DMI con 22% p/v de EPS, así como soluciones con EPS sulfonado al 3% (EPS-3) y 5% (EPS-5), las cuales fueron agitadas por 20 h a temperatura ambiente. La solución homogénea se extendió en una placa de vidrio con un espesor de 33 μm, para luego sumergirse directamente a un baño de coagulación compuesto por isopropanol y ácido acético (IPA/AA) en una proporción de 80:20 v/v durante 20-30 min. Finalmente, las membranas se almacenaron en agua destilada hasta su posterior caracterización y evaluación. A través de las micrografías obtenidas mediante SEM, se confirma la formación de una membrana asimétrica con una capa superior densa y un soporte inferior poroso. la membrana de EPS presentó el mayor ángulo de contacto (89,3°) y el menor radio promedio de poro (0,27 nm), mientras que la membrana de EPS-5 mostró un menor ángulo (71,2°) y un mayor radio de poro (0,91 nm), confirmando que la adición de grupos sulfónicos ($-SO_3H$) incrementa la polaridad de la superficie. Esta modificación química impactó directamente en el rendimiento, el flujo de permeado y el índice de recuperación de flujo aumentaron de 0,054 a 0,63 L/m^2h y 24,4 a 64,4% a 5 bar y de 1,01 a 4,83 L/m^2h y 36,8 a 55,3% a 9 bar, además de obtener un rechazo de colorante entre 94-97%, siendo el mejor rendimiento para todos los casos de EPS-5. Los resultados demuestran la viabilidad de fabricar membranas funcionales a partir de EPS reciclado utilizando DMI como solvente verde, además de evidenciar que la sulfonación es una modificación química eficaz para mejorar las propiedades morfológicas y rendimiento.

En el año 2024 Sriani et al., fabricaron membranas a partir EPS reciclado, recolectado de empaques de comida desechados, Nmetil-2-pirrolidona (NMP) como solvente y PVP como agente generador de poros, con el fin de estudiar el rendimiento en la separación de microalgas del agua. Las

membranas fueron fabricadas a partir del método NIPS, para ello se prepararon 5 soluciones de NMP con 20% p/p de PS que fueron agitadas a 80°C hasta conseguir soluciones homogéneas, luego se añadió PVP a distintas concentraciones (0, 2, 4, 6 y 8% p/p) para finalmente estirar la solución en una placa de vidrio con un espesor de 100 µm y pasar a un baño de coagulación en agua por 24 h. De los estudios realizados, se confirma gracias al SEM que la incorporación de PVP incrementó el tamaño de poros y la porosidad de las membranas, lo que se ve reflejado en la permeabilidad, que varía entre 449,7-970,5 L/m^2hbar la cual aumenta proporcionalmente según la cantidad añadida de PVP. Por otro lado, el rechazo de microalgas llega hasta el 100% para la *Spirullina* (300-500 µm) y hasta un 50% para la *Chlorella vulgaris* (2-10 µm). De esta manera, demuestran que es posible utilizar EPS reciclado como polímero y PVP como generador de poros en la fabricación de membranas empleadas en el filtrado de agua.

De igual manera Mansor et al. (2024), fabricaron membranas de bajo costo a partir de de poliestireno expandido desechado (WPS) y fluoruro de polivinilideno (PVDF) con dimetilformamida (DMF) como solvente. Las membranas fueron fabricadas mediante el método NIPS, formando una solución con un contenido de 18% p/p de WPS, además de soluciones modificadas de WPS-PVDF, en donde el contenido de polímero (18% p/p) se preparó a diferentes proporciones de peso de PVDF (10, 25, 50, 75 y 90%). Las soluciones fueron estiradas sobre un soporte mecánico de tela no tejida (TNT) de poliéster a un espesor de 200 µm. La inversión de fases se llevó a cabo sumergiendo las láminas en un baño de agua durante la noche. De los estudios, la membrana con mayor porosidad (92%) y menor ángulo de contacto (73,1°) corresponde a la que fue fabrica solo con WPS, lo que conlleva a que esta alcance la mayor permeabilidad con un valor de 242 Lmh/bar. El estudio de rechazo de colorantes muestra que este aumenta a medida que aumenta el contenido de PVDF, sin embargo, la membrana de WPS alcanza valores de hasta 40%. En otras pruebas, la membrana que obtiene mejores resultados corresponde a la que contiene WPS-PVDF (50%-50%), pero de todas maneras la de WPS puro obtiene valores cercanos, lo que demuestra que es posible fabricar membranas a partir de desechos de PS y aplicarlas en procesos de separación de colorantes del agua.

Por otro lado, Lima et al. (2025) fabricaron membranas mediante el método de *electrospinning* a partir de una solución de EPS y una mezcla de solventes compuesta por N,N-dimetilformamida (DMF) y DL-limoneno. Las soluciones fueron preparadas con diferentes concentraciones de polímero (5-25%), además de diferentes mezclas de solventes variando el porcentaje de DL-limoneno (10-50%). Para formar las membranas se utilizó una bomba de infusión, que permite variar el caudal de inyección (0,4-1,2 mL/h), conectada a una jeringa que presentaba una aguja de 24 G (0,55 mm) la cual estaba conectada a una fuente de alto voltaje (15-25 kV). Las fibras fueron recolectadas en una malla de cobre posicionada sobre una placa conectada a tierra ubicada a 10 cm de la aguja, formando membranas para el filtrado de aire y agua. Al caracterizar las membranas se observa de las micrografías obtenidas del SEM, que las fibras presentan diámetros en un rango de 240 a 1537 nm, el cual se ve afectado directamente por el contenido de EPS, ya que al aumentar favorece la producción de fibras más uniformes y homogéneas, por otro lado, el DL-limoneno produce el efecto contrario, ya que a mayor porcentaje las fibras disminuyen su diámetro y

presentan una mayor cantidad y tamaño de poros. De las pruebas de filtrado de aire, se obtienen remociones de hasta 75,15%, mientras que el filtrado de nanopartículas de óxido metálico (Fe_3O_4, ZnO, TiO_2 y CeO_2) del agua, presentó una retención de 84% de Fe_3O_4 y 76% ZnO, influenciado por las interacciones electrostáticas. Los resultados demuestran que es posible la fabricación de membranas a partir de EPS y DL-limoneno, aplicables en filtrado de aire y agua.

En cuanto a, Ramírez-Martínez et al. (2023) estudiaron el uso de dos solventes provenientes de fuentes naturales: a-pineno y d-limoneno, en la fabricación de membranas para el tratamiento de agua a partir de polipropileno (PP) virgen y reciclado y polietileno de baja densidad (LDPE). Las membranas fueron fabricadas mediante el método TIPS, las soluciones fueron preparadas a 130°C en un baño de aceite para asegurar la homogeneidad, formando láminas de 250 µm de espesor y finalmente realizando un baño de etanol para realizar el cambio de fase. De las membranas resultantes, avanzan con las pruebas de las membranas fabricadas con PP virgen y reciclado, obteniendo una permeabilidad para distintos hidrocarburos (heptano, tolueno y n-hexano) entre 0,22-0,56 L/m^2hbar, para las pruebas de rechazo, utilizan una mezcla de agua y tolueno, siendo el agua el rechazo, obteniendo un rendimiento promedio del 95% y logrando un permeado de tolueno con un 99,7% de pureza. De esta manera, se demuestra que es posible utilizar solventes verdes para la fabricación de membranas, además de polímeros reciclados en la separación de emulsiones de agua con aceite.

El año 2020, Liu et al. utilizaron trioctil trimelitato (TOTM) como solvente verde para fabricar membranas con etileno-clorotrifluoroetileno (ECTFE) un fluoro polímero termoplástico. Las membranas fueron fabricadas vía TIPS, se prepararon soluciones homogéneas con distintos contenidos de ECTFE a 250°C, la solución fue vertida en un molde el cual fue colocado al horno a 250°C por 15 min, para luego ser enfriado con agua y pasar a un baño de coagulación con etanol para completar el intercambio de fases. Las membranas fueron caracterizadas según su porosidad (50%-65%), tamaño promedio de poros (0,1-0,3 μm), ángulo de contacto ($\sim 130°$) y finalmente fueron probadas con experimentos de destilación al vacío donde la corriente de entrada era una solución salina con 3,5% p/p de NaCl, obteniendo resultados de permeabilidad de 23,09 kg/m^2h y un rechazo de sales del 99,9%. El estudio demuestra que es posible utilizar TOTM como solvente verde, además del potencial de aplicar las membranas fabricadas en procesos de destilación al vacío.

El PVP ha sido empleado en diversos estudios como agente generador de poros en el proceso de fabricación de membranas. El año 2021 Russo et al., fabricaron membranas utilizando Tamisolve® NxG como solvente no tóxico, junto con fluoruro de polivinilideno (PVDF) y PVP al 5% p/p. Las membranas fueron fabricadas con el método NIPS, formando membranas de 350 µm de espesor y realizando la inversión de fases con un baño de agua durante la noche. Al caracterizar las membranas se observó que la adición de generador de poros no significó gran diferencia en la porosidad y tamaño de poros. Mientras que en la permeabilidad la membrana con PVDF puro obtuvo valores de 0 L/m^2hbar pasando a 22 L/m^2hbar con la adición de PVP. Sin embargo, estudian la adición de otro agente generador llamado polietilenglicol (PEG), el cual presenta

mejores resultados llegando a valores de 364 L/m^2hbar, logrando formar membranas en el rango de micro y ultrafiltración.

El año 2025, Swefi et al. fabricaron membranas de ultrafiltración a partir de polisulfona (PSU), dimetilformamida (DMF) y diferentes cantidades de PVP. Las membranas fueron formadas por el método NIPS, donde la solución se preparó con un contenido de 16% p/p de PSU y distintos contenidos de PVP (0,5, 0,75, 1,5, 2,5 y 5%), la solución fue estirada sobre una tela no tejida (TNT) de poliéster a un espesor de 40 µm y pasada a un baño de coagulación con agua por 24 h para completar el intercambio de fases. De las pruebas de rendimiento, se ve una mejoría en el rendimiento en las membranas con PVP en comparación a las membranas con WPS puro, se incrementa la permeabilidad de 320,3 L/m^2h a 345 L/m^2h a 0,5 MPa, y se incrementa el rechazo de ácido húmico de un 88,1% a un 91%. Sin embargo, estos incrementos corresponden a membranas con 0,75 y 1,5% de PVP, ya que a mayores cantidades el rendimiento se ve perjudicado. De todas maneras, se comprueba que al adicionar PVP el mecanismo de formación de poros se ve afectado, influyendo en la hidrofobicidad y porosidad, por ende, en el rendimiento.

Por último, en el trabajo de investigación realizado por Barañao Latuz et al. en el 2025, se propuso trabajar con poliestireno expandido reciclado y dos solventes verdes: d-limoneno y DMI, del estudio se obtuvo que las membranas fabricadas con DMI solo una logró obtener resultados en las distintas pruebas de rendimiento, que presentaba condiciones de diseño de 25% p/p de polímero, 3% p/p de agente generador de poros y 400 µm de espesor, mientras que en el caso de las membranas fabricadas con d-limoneno, 2 modelos lograron obtener resultados, en donde las condiciones de cada uno se definen para casos distintos. En primer lugar, cuando se requiere poco permeado y rechazo de particular de menor tamaño, asemejando a ultrafiltración, donde las condiciones de diseño son 20% p/p de polímero, 0% p/p de agente generador de poros y 300 µm de espesor, el segundo caso, cuando se requiere un alto flux y rechazo de partículas mayores, asemejando a procesos de microfiltración, donde las condiciones óptimas diseño son 25% p/p de polímero, 3% p/p de agente generador de poros y 400 µm de espesor.

A partir de la revisión realizada, se observa que, si bien existen diversos trabajos orientados hacia la sostenibilidad en tecnología de membranas, a la fecha, no se reportan investigaciones que integren de manera simultánea la totalidad de las variables de diseño consideradas en este estudio, es decir, la fabricación de membranas mediante el método NIPS, a partir de poliestireno expandido reciclado (EPS) y solventes verdes (D-limoneno y TOTM), incorporando PVP como agente generador de poros y TNT PES como soporte mecánico. Es precisamente en esta brecha la que otorga el valor e innovación de la presente investigación, la cual busca aportar un enfoque sostenible al desarrollo y optimización de membranas filtrantes para el tratamiento de agua. A continuación, en la Tabla 7 se presenta un resumen de los estudios destacando las variables que se trabajan en este estudio.

Tabla 7. Resumen de estudios relacionados a la investigación.

Autores	Año	Polímero	% p/p	Solvente	Gen. de poros	Espesor (µm)	Soporte mecánico	Método
Santana-Luna et al.	2025	**EPS**	22	DMI		33		NIPS
Sriani, Mahardika, Aldhama, et al.	2024	**EPS**	20	NMP	**PVP**	100		NIPS
Mansor et al.	2024	**EPS** PVDF	18	DMF		200	**TNT PES**	NIPS
Ramírez-Martínez et al.	2023	PP LDPE	15-25	a-pineno, **d-limoneno**		250		TIPS
Lima et al.	2025	**EPS**	5-25	DMF, **d-limoneno**			Malla de cobre	Electro hilado
Liu et al.	2020	ECTFE	15-35	**TOTM**				TIPS
Russo et al.	2021	PVDF	10-18	Tamisolve® NxG	**PVP** PEG	350		NIPS
Swefi et al.	2025	PSU	14-22	DMF	**PVP**	40	**TNT PES**	NIPS

4. DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

4.1. Pruebas de compatibilidad

Para comprobar la compatibilidad teórica obtenida a partir de los parámetro de solubilidad de Hansen, se preparan soluciones al 15% p/p de polímero en un vaso precipitado de 20 mL con 5 mL de solvente, la solución se agita con un agitador magnético a 80°C y velocidad constante durante 90 minutos, con el fin de obtener una solución homogénea. De los resultados preliminares obtenidos, se determinó excluir el uso del TOTM del diseño factorial, continuando el estudio empleando solo D-limoneno como solvente.

4.2. Diseño experimental

Para determinar las condiciones que maximicen el rendimiento de las membranas, se planteó un diseño factorial completo, el cual considera 4 variables de diseño independientes, donde dos de ellas cuentan con 3 niveles y las otras con 2. Estas se detallan en la Tabla 8. Las variables dependientes por evaluar son la permeabilidad, rechazo de sal, disminución de turbidez, morfología, ángulo de contacto, porosidad y tamaño medio de poros.

Tabla 8. Variables independientes y niveles del diseño experimental.

Variables independientes	Niveles	Detalle de niveles
Contenido polímero, %p/p	3	15%, 20%, 25%
Contenido generador de poros, %p/p	3	0%, 0,75%, 1,5%
Soporte mecánico	2	Sin, Con
Espesor de membrana	2	200 µm, 300 µm

Los valores de las variables se establecieron en base a la recopilación de información efectuada en el estado del arte. Estas corresponden a las variables de diseño más mencionadas y con mayor variación en las publicaciones que abarcan el desarrollo de membranas sustentables. Al aplicar el diseño factorial completo, se obtiene un total de 36 experimentos a desarrollar, en donde cada uno da como resultado un modelo de membrana diferente. Las condiciones de cada una se detallan en la Tabla 9 a continuación. Cabe recalcar que todos los modelos de membranas se realizan en duplicado.

Tabla 9. Condiciones de diseño de las membranas.

Membrana	Soporte	% p/p PS	% p/p PVP	Espesor, µm
M1	Sin	15	0	200
M2	Sin	15	0	300
M3	Sin	15	0,75	200
M4	Sin	15	0,75	300
M5	Sin	15	1,5	200
M6	Sin	15	1,5	300
M7	Sin	20	0	200
M8	Sin	20	0	300
M9	Sin	20	0,75	200

M10	Sin	20	0,75	300
M11	Sin	20	1,5	200
M12	Sin	20	1,5	300
M13	Sin	25	0	200
M14	Sin	25	0	300
M15	Sin	25	0,75	200
M16	Sin	25	0,75	300
M17	Sin	25	1,5	200
M18	Sin	25	1,5	300
M19	Con	15	0	200
M20	Con	15	0	300
M21	Con	15	0,75	200
M22	Con	15	0,75	300
M23	Con	15	1,5	200
M24	Con	15	1,5	300
M25	Con	20	0	200
M26	Con	20	0	300
M27	Con	20	0,75	200
M28	Con	20	0,75	300
M29	Con	20	1,5	200
M30	Con	20	1,5	300
M31	Con	25	0	200
M32	Con	25	0	300
M33	Con	25	0,75	200
M34	Con	25	0,75	300
M35	Con	25	1,5	200
M36	Con	25	1,5	300

4.3. Metodología de preparación de membranas

La metodología se dividió en 3 etapas. En primer lugar, la fabricación de 36 membranas con distintas condiciones de diseño que se especifican en la Tabla 9 presentada anteriormente, en una segunda etapa de pruebas de rendimiento a las membranas, en donde se realizan estudios de permeabilidad, rechazo de sales y disminución de turbidez. Por último, caracterización de las membranas que presentan mejor rendimiento con estudios de morfología, análisis FT-IR, ángulo de contacto y porosidad.

4.3.1. Materiales

El EPS fue recolectado de plumavit en desuso del laboratorio, se redujo a trozos más pequeños para facilitar su uso, se limpió con etanol y se enjuagó con agua destilada tipo II para eliminar suciedad e impurezas presentes. Como solventes se utilizó D-Limoneno al 97% número de CAS 5989-27-5 y Trioctil Trimelatato (TOTM) al 99% número CAS 3319-31-1, Polivinil Pirrolidona

k30 número de CAS 9003-39-8 como agente generador de poros, todos adquiridos en Sigma-Aldrich (Chile), tela no tejida (TNT) de poliéster como soporte mecánico y agua destilada tipo II como no-solvente. Para el rechazo de sales, se utilizó una solución salina compuesta de sal fina para alimentos con agua tipo II y, por último, para las pruebas de turbidez se preparó una solución de caolín con agua tipo II.

4.3.2. Fabricación de membranas

Las membranas se preparan a partir del método de separación de fases por un no-solvente (NIPS). En un vaso precipitado de 20 mL, se mezcla 5 mL de solvente, junto con el EPS según las proporciones detalladas en la Tabla 9. La solución se agita con un agitador magnético a 80°C y velocidad constante durante 90 minutos hasta obtener una solución homogénea (Sriani, et al., 2024). La solución se pasa a un baño ultrasónico a 80°C por 1 h para eliminar burbujas. Luego, se extiende de manera uniforme sobre una placa de vidrio de 11x30 cm con la ayuda de un aplicador de película de acero inoxidable de 80 mm de largo, para formar las membranas según los espesores mencionados en la Tabla 9. En el caso de las membranas con soporte mecánico, una vez formada la lámina en la placa de vidrio, se coloca sobre ella la tela no tejida de poliéster con un tamaño de 90x32 cm asegurando que se cubra por completo, le tela es afirmada a la placa de vidrio con clips de aluminio para evitar que la tela se despegue o se mueva en los pasos posteriores. Las muestras se dejan secar en un horno convectivo a 50°C por 3 h, para evitar la mezcla de la solución con el no-solvente. Finalmente, se sumerge en un baño de coagulación con agua destilada tipo II a temperatura ambiente por 24 h para luego ser secadas y almacenadas para futuras pruebas y caracterización. En la Figura 5 se presenta un esquema gráfico simplificado sobre el proceso de fabricación de membranas.

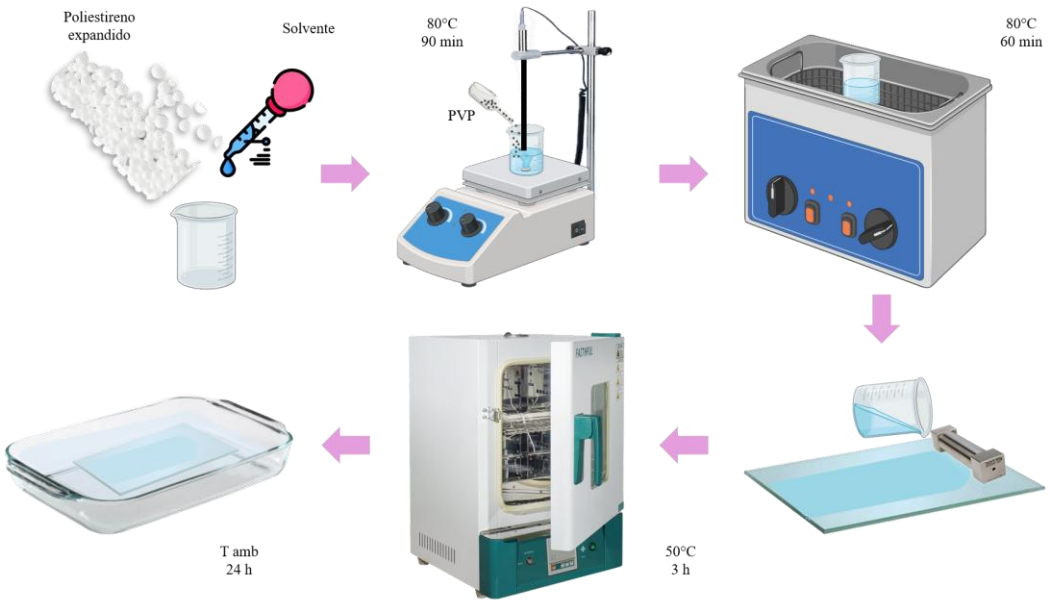


Figura 5. Diagrama de proceso de fabricación de membranas empleado en esta investigación (elaboración propia).

4.3.3. Rendimiento de las membranas

El rendimiento de las membranas se evaluó en base a 3 parámetros: permeabilidad, rechazo de sales y disminución de turbidez. Para esto se utilizó un sistema de filtración (Figura 6), en donde solo se varió el caudal de alimentación a tratar.

El sistema se constituye por una estanque de alimentación que contiene el fluido de entrada. Este es impulsado a través de una manguera conectada a una bomba dosificadora de diafragma magnética (Gamma/ XL, ProMinent, Heidelberg, Alemania). El flujo pasa por un amortiguador de presión o *dampener* (RC-10PVC-E38, Blacoh, Riverside, Estados Unidos) para estabilizar los pulsos generados por la bomba, y por un manómetro (Veto, Chile) que registra la presión del sistema. Posteriormente, el fluido ingresa a una celda de flujo tangencial (CF042D, Sterlitech Corporation, Washington, Estados Unidos) que contiene la membrana en su interior con un área activa de 0,0042 m^2 (dimensiones de 9,2 x 4,6 cm aproximadamente). De la celda se obtienen dos flujos, por la parte superior el permeado el cual es recolectado en una probeta de 1 L para medir su volumen, por la parte inferior, el rechazo que retorna al estanque de alimentación a través de una válvula de aguja, empleada para controlar la presión del sistema.

Para las pruebas de permeabilidad las membranas se evaluaron a 3 presiones distintas; 1, 3 y 5 bar, mientras que, para las pruebas de rechazo de sales y disminución de turbidez, se fijó una presión de operación constante de 3 bar. En todos los casos, el tiempo de operación fue de 10 minutos. Es importante destacar que la válvula de retorno nunca se cerró en su totalidad, ya que esto alteraría el régimen del flujo tangencial del sistema.

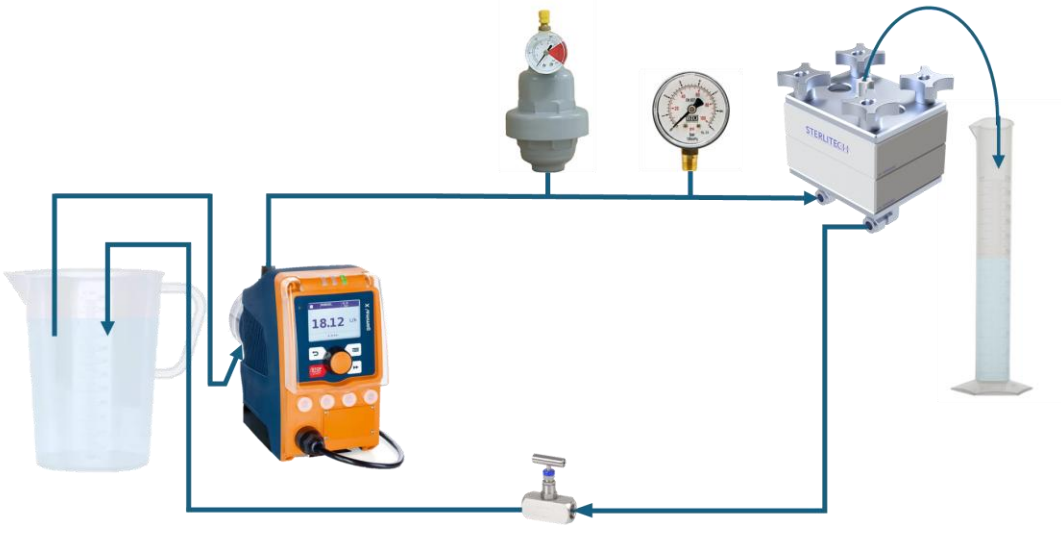


Figura 6. Sistema de filtración para pruebas de rendimiento (elaboración propia).

4.3.3.1. Permeabilidad

La permeabilidad de las membranas se determinó operando el sistema con agua destilada tipo II como fluido de alimentación. El flux de permeado (J) se obtuvo a partir de la ecuación 7 (Santana-Luna et al., 2025).

$$J = \frac{V_p}{A \cdot t} \tag{7}$$

Donde J es el flujo de permeado en L/m^2h, V_p es el volumen de permeado en L, A el área activa de la membrana en m^2 y t el tiempo de operación en h.

La permeabilidad (L_p) se calcula a partir de la ecuación 8 (Cardoso et al., 2024).

$$L_p = \frac{J}{\Delta P} \tag{8}$$

Donde L_p es la permeabilidad en $L/m^2h \cdot bar$ y ΔP es la presión transmembrana en bar

4.3.3.2. Rechazo de sales

Para evaluar el rechazo de sales, se utilizó una solución de agua destilada tipo II con NaCl a una concentración de 2.000 mg/L. El porcentaje de rechazo (R) se calculó según la ecuación 9 (Yam-Cervantes et al., 2024).

$$R(\%) = \left(1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_a}\right) \cdot 100 \tag{9}$$

Donde σ_p es la conductividad del permeado y σ_a la conductividad inicial de alimentación, ambas en $\mu S/cm$. La conductividad fue medida con un conductímetro PP-203 Portable Meter (Gondo Ezdo, Taiwan)

4.3.3.3. Disminución de turbidez

Por último, para evaluar la disminución de turbidez, se empleó como fluido de alimentación una solución agua tipo II con caolín a una concentración de 500 mg/L, la cual se mantuvo con agitación constante para asegurar su homogeneidad. El porcentaje de disminución de turbidez (τ) se obtuvo a partir de la ecuación 10 (Sureash et al., 2026).

$$\tau(\%) = \left(1 - \frac{\tau_p}{\tau_a}\right) \times 100 \tag{10}$$

Donde τ_a corresponden a la turbidez inicial de la solución de alimentación y τ_p a la turbidez del permeado, ambas en NTU. La turbidez se midió con un turbidímetro LT-TU2016, Twilight (Monterrey, Mexico)

Para cada prueba se midió la turbidez inicial de la solución, se operó el sistema según el tiempo establecido recolectando el flujo de permeado y se midió la turbidez final del permeado.

4.3.4. Caracterización de las membranas

Para establecer una relación entre el rendimiento y las propiedades fisicoquímicas de las membranas, se caracterizaron según morfología, análisis FT-IR, porosidad, tamaño medio de poros y ángulo de contacto.

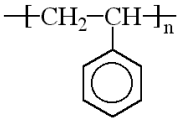
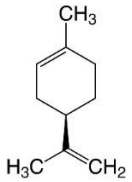
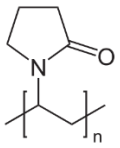
Las muestras evaluadas se seleccionaron en base a dos criterios, i) membranas que presentaron los mejores resultados de permeabilidad, rechazo de sales y disminución de turbidez, y ii) que simultáneamente permiten comparar el efecto de las variables de diseño (concentración de poliestireno, concentración de PVP y espesor).

FT-IR

La espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FT-IR-ATR) es una técnica analítica utilizada para identificar y determinar los grupos funciónales de una muestra. Esta funciona dirigiendo un haz de luz infrarroja hacia un cristal ópticamente denso con un alto índice de refracción (diamante, Ge, ZnSe) que produce múltiples reflectancias internas generando ondas evanescentes que se extiende fuera del cristal. Las ondas viajan hacia la muestra que se encuentra en contacto con la superficie del cristal, la cual absorbe parte de la energía en longitudes de onda especificas según sus enlaces moleculares. La luz restante, se refleja de vuelta al cristal traspasándolo hacia un detector que registra la luz como una señal de interferograma que luego genera el espectro infrarrojo (Mohamed et al., 2017).

Para determinar los grupos funcionales de las membranas y evaluar la presencia o ausencia de nuevos grupos funcionales en su superficie, las muestras se analizaron en un espectrofotómetro FTIR (FT/IR-4X, JASCO, Tokyo, Japón) equipado con un accesorio ATR de reflexión simple (ATR PRO 4X VIEW, JASCO, Tokyo, Japón) y una punta de diamante. Las mediciones se ejecutaron con el programa *Spectra Measurement* en un rango de número de onda de 4000-400 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1}. Previo a cada lectura, se registró un blanco o *background* ambiental con el cristal limpio y vacío para eliminar la interferencia del $\mathrm{CO_2}$ y $\mathrm{H_2O}$. Posteriormente, se midió la muestra de membrana para obtener un gráfico de longitud de onda vs absorbancia. Los datos se preocesaron en el programa *Spectra Analysis* para identificar los *peaks* de absorbancia y su respectiva longitud de onda. Finalmente, se compararon los valores de longitud de onda de los *peaks* obtenidos con los valores teóricos reportados en la bibliografía correspondientes a los enlaces y grupos funcionales característicos del poliestireno, el d-limoneno y la polivinilpirrolidona. Dicho valores se presentan en la Tabla 10 a continuación.

Tabla 10. Grupos funcionales y longitud de onda esperado (Nakanishi, 1962).

Compuesto	Estructura	Grupos funcionales	Longitud de onda, λ	Intensidad
Poliestireno		ν (C–H) aromático	~3030	*m*
		ν ($–CH_2–$) alcano	2925-2850	*f*
		ν (C=C) aromático	1600-1450	*m*
		δ ($–CH_2–$) alcano	~1470	*m*
		δ_{ip} (C–H) aromático	1225-950	*m*
		δ_{oop} (C–H) aromático	900-690	*mf*
		δ_{oop} anillo	560-418	*f*
D-limoneno		ν ($=CH_2$) alqueno terminal	3080-2975	*d*
		ν (=CH–) alqueno endociclico	~3020	*m*
		ν ($–CH_3$) metilos terminales	2960-2870	*f*
		ν ($–CH_2–$) cadena cíclica	2925-2850	*f*
		ν (C=C) exo y endocíclico	1670-1645	*d*
		δ_{ip} ($–CH_2–$) anillo	~1470	*m*
		δ ($–CH_3$) metilos terminales	~1380	*m*
		δ_{oop} ($=CH_2$) vibración H	~890	*f*
		δ_{oop} (=C–H) proton anillo	850-790	*f*
Polivinil pirrolidona		ν ($–CH_2–$) alcano	2925-2850	*m~f*
		ν (–CO–NHR–) banda amida I	1680-1655	*mf*
		δ ($–CH_2–$) alcano	~1470	*m*
		δ (C–H) alcano	~1340	*m*
		ν (C–N) amina	1230-1030	*d*
		δ_{oop} (N–C=O)	650	*d*

ν = tensión; δ = flexión; δ_{ip} = flexión en el plano; δ_{oop} = flexión fuera del plano; d = débil; m =media; f = fuerte; mf = muy fuerte.

Morfología

El estudio morfológico superficial de la membrana proporciona información estructural a nivel atómico o nanométrico sobre la forma, distribución y tamaño de los poros, la rugosidad y una correlación entre las características de la membrana y su comportamiento en el proceso. Existen diversas técnicas para este estudio, pero una de las más comunes es la microscopia electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) (Alqaheem & Alomair, 2020).

Para ello se utilizó un microscopio electrónico de barrido que funciona de manera similar a un microscopio óptico, pero utiliza electrones en lugar de luz, enviando un haz de electrones concentrados a la muestra, que genera diversas señales como resultado de las interacciones de los electrones con la superficie, las cuales son recolectadas por un detector que las analiza para formar una imagen. Debido a que los polímeros son materiales con una baja conductividad, para obtener imágenes de calidad y además protegerlas del daño térmico debido a la acumulación de carga, las membranas pasarón por una previa preparación, en donde se montaron pequeños trozos de

membrana en un porta muestra según las orientaciones requeridas (capa superficial y sección transversal) y luego se realizó un proceso de metalizado, en el cual las muestras fueron recubiertas con una capa de material conductor, en este caso oro, mediante una pulverización catódica al vacío para formar una película fina de 10 nm (Alqaheem & Alomair, 2020).

Una vez realizado el metalizado, los porta muestras fueron montados en el carrusel del microscopio electrónico de barrido de presión variable (TM3000, Hitachi, Tokyo, Japón), se encendió a una aceleración de voltaje de 15 kV y se configuró con magnificaciones de entre x150-x7000. Las imágenes se obtuvieron de dos zonas distintas tanto de la superficie como de la sección transversal, a diferentes magnificaciones.

Porosidad y tamaño de poro

La porosidad de las membranas se determinó mediante el método de pesaje húmedo-seco. Las membranas fueron sumergidas en un baño de agua destilada a temperatura ambiente por 24 h, para asegurar su completa saturación. Luego, fueron retiradas del baño y se eliminó suavemente el exceso de agua con papel absorbente, para registrar el peso con una balanza analítica. Posteriormente, las membranas se secaron en un horno convectivo a 50°C por 24 h para finalmente registrar su peso seco.

La porosidad (ε) se calculó según la ecuación 11 (Teow et al., 2025).

$$\varepsilon(\%) = \frac{\frac{(W_w - W_D)}{\rho_w}}{\frac{W_w - W_D}{\rho_w} + \frac{W_D}{\rho_p}} \cdot 100 \qquad (11)$$

Donde W_w y W_D son el peso de la membrana húmeda y seca en g, ρ_w y ρ_p son la densidad del agua y poliestireno en g/mol.

El tamaño medio de poro de la membrana se determinó utilizando la ecuación de Guerout-Elford-Ferry, expresado según la ecuación 12 (Teow et al., 2025):

$$r_m = \sqrt{\frac{(2{,}9 - 1{,}75\varepsilon)8\eta l Q}{\varepsilon \cdot A \cdot \Delta P}} \qquad (12)$$

Donde r_m es el tamaño medio de poro de la membrana en m, η es la viscosidad del agua a 25°C ($8{,}9\times 10^{-4}$Pa s), l es el espesor de la membrana en m, Q es el volumen de permeado por unidad de tiempo en m^3/s, A es el área activa de la membrana en m^2 y ΔP es la presión de operación en Pa.

Humectabilidad

La humectabilidad es la capacidad que tiene un líquido para extenderse y mantenerse en contacto sobre la superficie de un sólido. Esta afinidad superficial se cuantifica comúnmente a través del ángulo de contacto (θ) formado en la interfaz solido-liquido-gas. Generalmente, un ángulo menor a 90° indica una naturaleza hidrofílica, es decir, que existe una alta afinidad interfacial en donde el líquido tiende a esparcirse fácilmente sobre la superficie, por el contrario, valores mayores a 90°

indican un comportamiento hidrofóbico, en donde el líquido repele la superficie y tiende a conserva una geometría esférica. En casos extremos, un ángulo cercano a 0° indica una superficie super hidrofílica, donde el líquido se esparce por completo o casi por completo, mientras que ángulos mayores a 150° corresponden a superficies super hidrofóbicas, en donde la superficie repele casi al 100% al líquido. (Hebbar et al., 2017).

La superficie de las membranas se evaluó midiendo el ángulo de contacto mediante el método de la gota de Sésil con un tensiómetro óptico (Attension Theta, Biolin scientific, Gotherburg, Sweden). Con una micropipeta de precisión se deposita una gota de 5 µL de agua destilada sobre la superficie seca de la membrana a temperatura ambiente, para luego grabar su comportamiento por 10 s. Las imágenes son analizadas utilizando el software OneAttension (Biolin Scientific, 2016), el cual determina el ángulo de contacto ajustando la ecuación de Young-Laplace al perfil de la gota por ambos lados. Este modelo matemático considera el efecto de la gravedad sobre la masa de la gota, lo que hace mucho más preciso el resultado. Para reducir el error experimental, se promedian los datos obtenidos de 5 mediciones realizadas en puntos aleatorios de la superficie de la membrana (Sriani et al., 2026).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Pruebas de compatibilidad

Para realizar las pruebas de compatibilidad experimentales se realizó inicialmente una evaluación de compatibilidad teórica a partir de la relación RED utilizando los parámetros de solubilidad de Hansen presentes en el Anexo A. A partir de los cálculos realizados se obtienen los valores RED para diversos solventes verdes presentados en la Tabla 11. Considerando que los valores de RED < 1 indican una alta probabilidad de solubilidad (afinidad molecular), se obtuvo que los solventes compatibles con el poliestireno corresponden al p-cimeno (0,54), el Cyrene (0,58), Tomizolve NxG (0,60), dimetil isosorbida (DMI) (0,64), d-limoneno (0,72), α-pineno (0,77) y trioctil trimelitato (0,78). En la zona limite (RED ≈1) se encuentran compuestos como el aceite de soya (0,99), el lactato de metilo (0,98) y el carbonato de propileno (0,98). Mientras que, por el contrario, dentro de los solventes que presentan valores de RED > 1 se encuentra el carbonato de butileno (1,30), el carbonato de etileno (1,29) y la 2-pirrolidona (1,11), que presentan una baja afinidad comportándose como un mal solvente para el poliestireno expandido.

Tabla 11. Resultados de análisis de compatibilidad según relación RED.

Compuesto	R_a	RED
2-pirrolidona	14,07	1,11
Aceite de ricino	13,32	1,05
Aceite de soya	12,56	0,99
Acetato de butilo	11,38	0,90
Agnique AMD 3L	14,79	1,16
A-pineno	9,74	**0,77**
Carbonato de butileno	16,50	1,30
Carbonato de etileno	16,37	1,29
Carbonato de propileno	12,48	0,98
Cyrene	7,40	**0,58**
Dimetil isosorbida (DMI)	8,17	**0,64**
Dimetil lactamida (DML)	14,79	1,16
Dimetil sulfoxido (DMSO)	13,45	1,06
D-limoneno	9,12	**0,72**
Fosfato de trietilo (TEP)	11,73	0,92
γ-Valerolactona (GVL)	12,14	0,96
Lactato de etilo	13,52	1,06
Lactato de metilo	12,50	0,98
P-cimeno	6,88	**0,54**
PolarClean	13,00	1,02
Tomisolve NxG	7,57	**0,60**
Trioctil trimelitato (TOTM)	9,96	**0,78**

De los solventes que presentan afinidad con el poliestireno expandido se descartó el DMI ya que este fue trabajado por Barañao Latuz et al. en el 2025, en donde se obtuvieron resultados desfavorables en las membranas fabricadas con el solvente, ya que solo un modeló logró obtener resultados en las distintas pruebas de rendimiento, mientras que las demás se rompieron durante la operación del sistema. Por otro lado, se decide continuar con el uso del d-limoneno y se considera un nuevo solvente el cual se selecciona en base a la disponibilidad de los solventes en el país al momento de realizar el estudio, por lo que se continua con el TOTM. También se consideró el uso del α-pineno, pero se descarta para tener un diferencia en cuanto al origen del solvente, ya que tanto el d-limoneno como el α-pineno se obtienen de fuentes naturales como hojas o desechos frutícolas.

Luego de seleccionar los solventes se realizaron las respectivas pruebas de compatibilidad. El d-limoneno logró formar una solución homogénea a las condiciones señaladas en la metodología, permitiendo formar una lámina plana al espesor deseado y pasando las etapas posteriores del proceso de fabricación de secado e inversión de fases con baño de coagulación de agua.

En lo que respecta el TOTM, a pesar de que presenta un valor RED de 0,78, que teóricamente lo clasifica como un solvente favorable, experimentalmente presentó diferentes problemas a lo largo del proceso de fabricación. En primer lugar, no logró formar una solución homogénea a las condiciones de agitación señaladas en la metodología (80°C por 90 min), el poliestireno expandido al entrar en contacto con el solvente logra disolverse con dificultad, pero luego de agregar una cierta cantidad se comenzó a notar una separación entre el poliestireno y TOTM, lo que resultó en una esfera compacta de polímero suspendida en el solvente como se pueden apreciar en la Figura 7. En base a estos resultados, se decidió modificar las condiciones de agitación probando distintas temperaturas (100-150°C), consiguiendo finalmente una solución homogénea al agitar la solución a 150°C por 90 min.

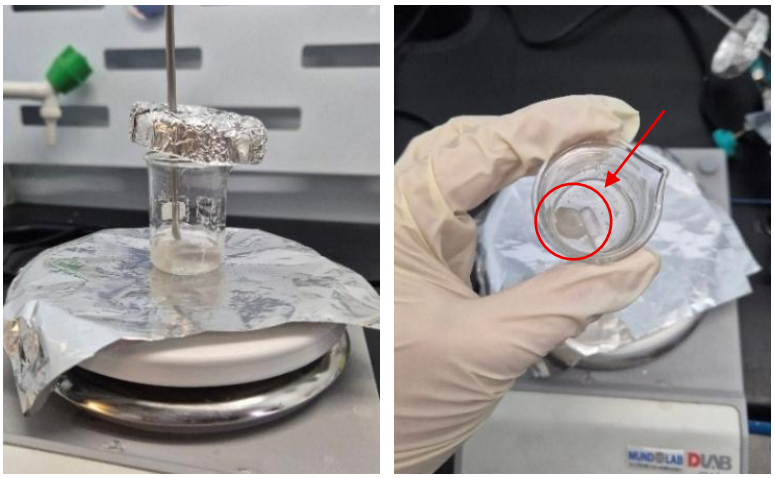


Figura 7. Solución de 15% de PS con TOTM como solvente a 50°C.

Luego de obtener la solución homogénea se pasó al baño ultrasónico (80°C por 1 h) para eliminar posibles burbujas que se hayan formado, pero debido a la baja de temperatura que enfrenta la

solución, esta se solidificó en el vaso a los segundos. Se decidió omitir esta etapa y pasar de la agitación directamente a formar la película con la solución sobre la placa de vidrio, pero nuevamente debido al cambio brusco de temperatura ya que la placa de vidrio se encuentra a temperatura ambiente (~20°C) al igual que el aplicador de acero inoxidable, la solución se solidificó antes de poder ser estirada como se puede observar en la Figura 8. Para evitar este cambio brusco de temperatura, se optó por calentar tanto la placa de vidrio como el aplicador de película en un horno convectivo a 100°C de manera simultánea a la preparación de la solución, una vez lista la solución esta se vierte inmediatamente en la placa calentada y se logró forma la respectiva película, la cual continuó a la etapa de secado a 55°C por 3 h en un horno convectivo.



Figura 8. Solución solidificada sobre placa de vidrio a temperatura ambiente (~20°C).

Debido a la naturaleza aceitosa del solvente y a su alto punto de ebullición, al momento de retirar la placa del horno se observó que tanto la lámina como la placa se encontraban cubiertas completamente por el solvente, ya que este logra abandonar la matriz polimérica pero no se evapora. A pesar de ello, la lámina se divisaba sin daños en la estructura por lo que se decide continuar con el baño de coagulación. En el momento en que entra en contacto con el agua, la matriz polimérica comienza a desprenderse por partes impidiendo obtener una lámina continua. Se decide nuevamente omitir este paso de la metodología y pasar del estiramiento de la película directo al baño de coagulación.

Con las respetivas modificaciones se obtiene una solución homogénea con agitación a 150°C por 90 min, que se estira sobre una placa de vidrio calentada a 100°C y se logra pasar al baño de coagulación con agua por 24 h. Sin embargo, al momento de retirar la lámina de la placa de vidrio, esta se vuelve quebradiza y con un aspecto a cera de vela lo que la vuelve compleja de manipular, como se puede observar en la Figura 9. Además, luego del paso de unas horas se observó que el solvente no logró salir de matriz como se espera que suceda durante el intercambio de fases, ya que todo el remanente fue absorbido por el papel Kraft en donde se almacenó la membrana.



Figura 9. Membrana de 15% PS y TOTM posterior al baño de coagulación.

Finalmente, debido a la complejidad para fabricar membranas a partir del sistema poliestireno-TOTM, se decide descartar el Trioctil trimelitato como solvente y continuar únicamente con el d-limoneno, sin embargo, es importante destacar que a pesar de no lograr obtener resultados favorables se pudo comprobar experimentalmente que no es posible fabricar membranas a partir de poliestireno expandido con Trioctil trimelitato como solvente verde mediante el método NIPS.

5.2. Fabricación de las membranas

En base al diseño experimental se fabricaron 36 modelos de membranas, utilizando el método NIPS, en donde 18 modelos resultaron en membranas viables en términos de estructura, es decir, se logró formar una lámina plana que puede ser manipulada. En la Tabla 12 se pueden observar las membranas fabricadas sin soporte mecánico y en la Tabla 13 las membranas fabricadas con soporte mecánico.

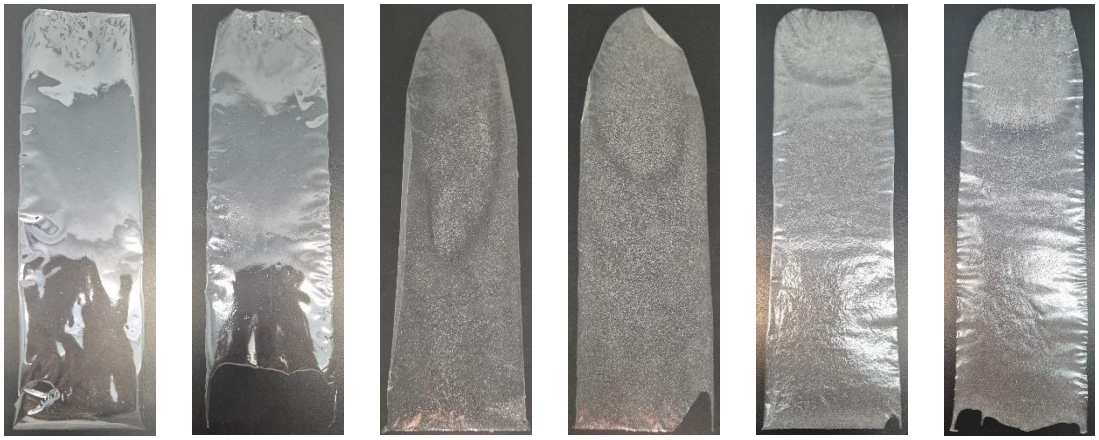
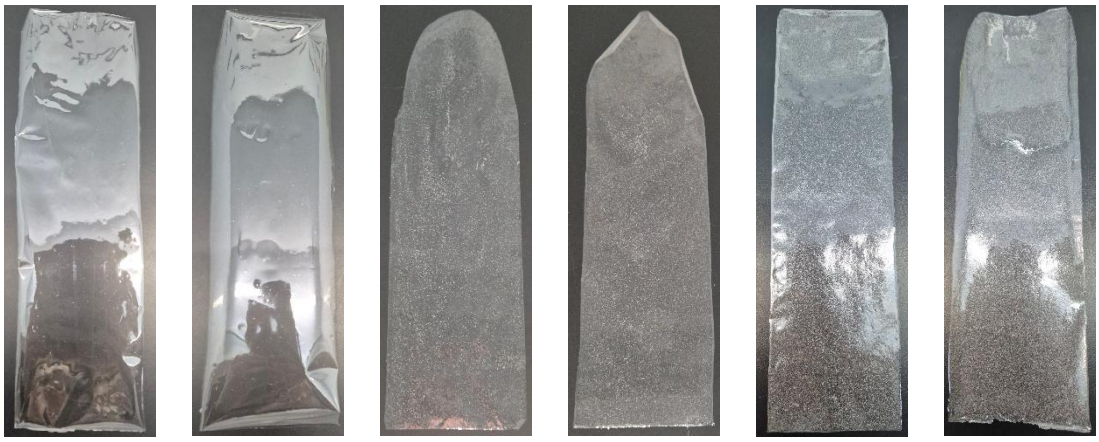
Al observar la matriz de las membranas obtenidas sin soporte mecánico, se aprecia una transición morfológica y estructural clara a nivel macroscópico, la cual está directamente vinculada a las condiciones de diseño. Centrándose únicamente en la variable del contenido de polímero, las membranas fabricadas con una concentración de 15% PS resultaron sumamente delgadas, frágiles y difíciles de manipular, con tendencia a sufrir daños estructurales con mayor facilidad, lo cual se aprecia en su apariencia vítrea y translucida, además de presentar rugosidad en sus extremos como resultado de una retracción del polímero durante el proceso de secado o inmersión, ya que la película no logró adherirse firmemente al soporte (placa de vidrio).

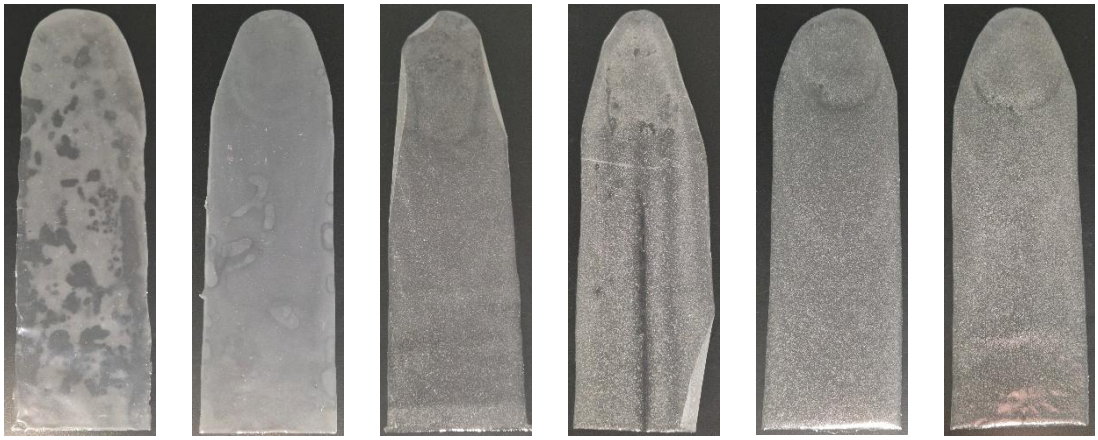
A medida que la concentración del polímero aumenta (20% PS), se puede apreciar que las membranas adquieren una mayor resistencia física lo que permite que sean manipuladas con mayor facilidad, sin embargo, a pesar de no presentar roturas en su superficie aún se puede apreciar una pequeña rugosidad y tendencia a encogerse sobre sí misma. Las membranas fabricadas con el nivel más alto de concentración (25% PS) debido al aumento de viscosidad de la solución resultan en láminas opacas, blanquecinas y con claras manchas irregulares a lo largo de la estructura, ya que un alto contenido de polímero dificulta el intercambio entre el solvente y no-solvente durante la

inmersión en el baño de coagulación, provocando que el agua tarde más en ingresar a las capas profundas cercanas a la placa de vidrio, por lo que el interior retiene parte del solvente mientras las capas superiores ya han comenzado a solidificarse. Por ello se obtienen laminas más compactas y densas, con una resistencia física mucho mayor, que permiten su manipulación sin presentar daños, sin embargo, esta resistencia puede resultar en futuros problemas de operación pudiendo ceder frente a altas presiones debido a la estructura rígida.

En cuanto a las membranas fabricadas con agente generador de poros (PVP), se puede observar que la superficie presenta un aspecto rugoso, texturizado fino, semi traslúcido y con una gran cantidad de puntos blancos, que a priori pueden corresponder a remanentes del aditivo que no logró ser removido durante la inversión de fases o un efecto visual como resultado de una estructura más porosa. Como resultado de esta estructura, al contrario de lo que ocurre con el contenido de polímero, a medida que aumenta la concentración de PVP las láminas resultan ser menos compactas y densas, pero también menos rígidas, lo que permite que se puedan manipular con mayor facilidad y sin tanto riesgo de sufrir roturas o daños estructurales mayores.

Tabla 12. Membranas fabricadas utilizando el método NIPS, sin soporte mecánico.

	0% PVP		**0,75% PVP**		**1,5% PVP**	
	200 µm	**300 µm**	**200 µm**	**300 µm**	**200 µm**	**300 µm**
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
15% PS						
	M7	M8	M9	M10	M11	M12
20% PS						

	M13	M14	M15	M16	M17	M18
25% PS						

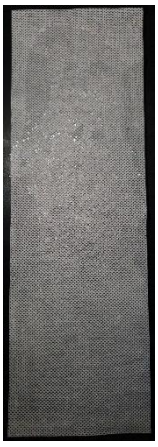
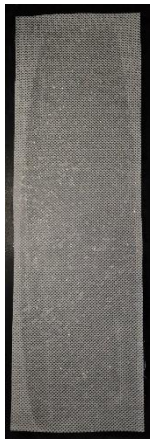
Por último, en lo que respecta al espesor la mayor diferencia se produjo en el comportamiento de los bordes de las membranas, a espesores más delgados (200 µm), la película intercambia masa libre (solvente y/o PVP) con mayor rapidez y se fija con mayor facilidad sobre la placa de vidrio, ya que el camino que debe recorrer el no-solvente hasta el final de la matriz es menor. A mayor espesor (300 µm), la matriz retiene al solvente y/o agente generador de poros por más tiempo durante el baño de coagulación, lo que genera una mayor tensión superficial y provoca que los bordes se replieguen de forma más pronunciada. Esta diferencia se puede apreciar en casi todos los pares de membranas ya sea como bordes doblados (M10) rugosos (M6) o replegados (M12-M18).

En base a lo observado, los resultados cualitativos sugieren que la combinación que podría presentar el mejor desempeño operacional en procesos de filtración corresponde a 25% PS y 1,5% PVP, con 200 o 300 µm de espesor. Estas membranas muestran visualmente un equilibrio adecuado entre consistencia estructural atribuida al polímero y una transición uniforme hacía la fase porosa generada por la PVP.

Por otro lado, al incorporar la tela no tejida de poliéster como soporte mecánico, el resultado cambió drásticamente, ya que la presencia del soporte generó un fenómeno de impregnación, en donde la solución de moldeo penetró en la porosidad de la tela durante la formación de la película, lo que provocó que, durante el proceso del baño de coagulación, parte de la matriz que se encontraba en contacto con la placa de vidrio terminara desprendiéndose de la tela, en vez de formar una lámina continua y adherida sobre la superficie.

Debido a que no se logra formar correctamente una lámina en ninguno de los diseños propuestos con la tela no tejida, no es posible observar el efecto que generan las variables de diseño de concentración de PVP y espesor, sin embargo, se puede apreciar la variación de la concentración de polímero, ya que a medida que aumenta, el área de tela que entró en contacto con la solución resulta ser más oscura o grisácea, como se puede observar en la última fila de la Tabla 13.

Tabla 13. Membranas fabricadas utilizando el método NIPS con soporte mecánico.

	0% PVP		**0,75% PVP**		**1,5% PVP**	
	200 µm	**300 µm**	**200 µm**	**300 µm**	**200 µm**	**300 µm**
15% PS	M19 	M20 	M21 	M22 	M23 	M24 
20% PS	M25 	M26 	M27 	M28 	M29 	M30 
25% PS	M31 	M32 	M33 	M34 	M35 	M36 

A pesar de los resultados poco claros respecto al posible funcionamiento de estas matrices, de igual manera son evaluadas en las pruebas de rendimiento de permeabilidad, ya que no se sabe con certeza si la impregnación ocurrida pudo generar alguna diferencia a nivel microscópico.

5.3. Rendimiento de las membranas

El rendimiento de las membranas fabricadas a partir de PS y d-limoneno, se evaluó a base del transporte de agua, utilizando agua destilada como flujo de alimentación, y el rechazo de contaminantes, utilizando una solución salina para el rechazo de sales y una solución de caolín para la disminución de turbidez. Las condiciones de diseño de las membranas variaron en cuanto a concentración de PS, concentración de PVP, espesor de la película y presencia de soporte mecánico. Además, es importante recalcar que las pruebas en duplicado corresponden a laminas independientes fabricadas bajo las mismas condiciones de diseño, por lo que las diferencias entre los resultados no reflejan el desgaste de una membrana, sino la reproducibilidad del método de fabricación. Un comportamiento dispar entre laminas indica que las condiciones de diseño son sensibles a variaciones en su fabricación, mientras que laminas con comportamiento similar demuestran consistencia.

5.3.1. Permeabilidad

La permeabilidad al agua se utiliza como el indicador principal de la eficiencia de las membranas, en la Figura 10 se presenta el flujo de permeado obtenido operando el sistema a 1 bar por las membranas fabricadas sin soporte mecánico.

Considerando las condiciones de diseño de las membranas, se puede observar un rendimiento similar en las membranas fabricadas sin agente generador de poros, donde para todas las concentraciones (15%, 20% y 25%) y espesores (200 y 300 μm), presentaron las permeabilidades más bajas y cercanas a cero. En el caso de las membranas fabricadas con un 15% de PS, M1-2 obtuvo un flux de 657 L/m^2h y M2-2 un flux de 66 L/m^2h, mientras que M1-1 y M2-1 no presentaron flujo de permeado. Esta situación se repitió en el caso de las membranas fabricadas con un 20% de PS, en donde se M7-2 presentó una permeabilidad de 571 L/m^2h y M8-1 de 21 L/m^2h. En el caso de las membranas fabricadas con 25% PS obtuvieron las permeabilidades más bajas de todos los modelos, siendo de 0 para M13-2 y M14 1 y 2, mientras que M13-1 solo alcanzo un valor de 56 L/m^2h, que pudo ser resultado de una rotura o mal posicionamiento de la membrana dentro de la celda. Estos resultados evidencian la ausencia o baja porosidad de las membranas, que además disminuye a medida que aumenta la concentración de polímero, consecuente con lo observado en la fabricación, ya que corresponden a membranas compactas y densas. Además, la variabilidad de los resultados sugiere una baja consistencia en la fabricación de estos modelos, en donde las permeabilidad pueden ser resultado de roturas en la estructura producidas en su manipulación u operación, y no poros formados durante la fabricación.

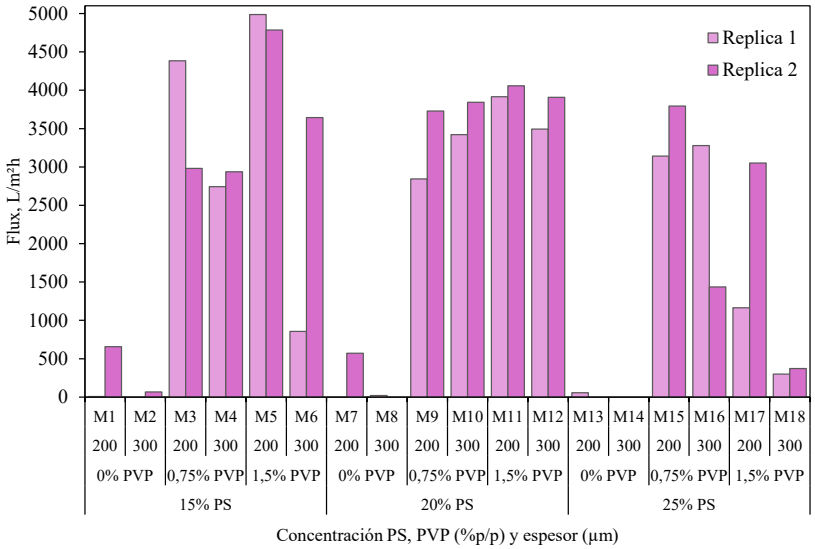


Figura 10. Flujo de permeado de membranas sin soporte mecánico a 1 bar.

La incorporación de PVP en la solución de moldeo genera un salto significativo en los valores obtenidos de flux, al añadir 0,75% PVP en los casos de 15% PS se obtuvieron valores aproximados de 3000 L/m^2h e incluso llegando a sobre los 4000 L/m^2h en el caso de M3-1, debido a que las membranas no generan resistencia al transporte del agua permitiendo pasar todo el flujo hacia el permeado e impidiendo que el sistema mantenga una presión de 1 bar. En el caso de las membranas fabricadas con 20% PS y 25% PS se observa un comportamiento similar, en donde los modelos M9, M10, M11, M12, M15 y una de las replica de M16 no generan resistencia hidráulica, permitiendo el paso directo del flujo hacia el permeado obteniendo valores entre 3200-3900 L/m^2h. Sin embargo, M16-2 logra operar a la presión deseada obteniendo un flux de 1436 L/m^2h, sin embargo, estos valores son mucho mayores a lo deseado considerando que la permeabilidad promedio de los procesos de microfiltración es de 500 $L/m^2h \cdot bar$.

En los casos en que se añadió 1,5% PVP, los modelos fabricados con 15% y 20% de PS presentan un rendimiento desfavorable, ya que solo una de las réplicas de M6 logra generar resistencia y operar a 1 bar obteniendo un flujo de permeado de 857 L/m^2h. Por el contrario, la combinación de 1,5% PVP y 25% PS presentan mejoras en el comportamiento operativo, logrando mantener la presión del sistema a 1 bar y obteniendo un flux de 1164 L/m^2h para M17-1, y de 300 y 371 L/m^2h para M18 1 y 2.

Por último, en lo que respecta a la variable del espesor de la membrana, se puede observar que existen casos en donde no genera mayor diferencia como sucede con los modelos de 20% PS con 0,75% PVP y 1,5% PVP, al igual que entre M3 y M4 y M15 y M16. Por el contrario, casos como las membranas de 25% PS y 1,5% PVP evidencian una clara diferencia, en donde el modelo de 300 µm presenta una disminución de aproximadamente 700 L/m^2h respecto a la de 200 µm, y siendo aún más drástico entre las membranas M5 y M6 con una diferencia de más de 3500 L/m^2h.

A partir de la Figura 11 se puede observar que, al operar el sistema a 3 bar, las membranas siguen la misma tendencia que a 1 bar, pero aumenta el flux obtenido de manera general. Las membranas

sin agente generador de poros con 25% PS no presentan flujo de permeado, al igual que una de las réplicas de M2, M7 y M8. Mientras que M1 y M2-2 (15% PS) aumentan su flujo de permeado obteniendo valores de 957, 1371 y 400 L/m^2h respectivamente, al igual que M8-1 y M7-2 (20% PS) que obtuvieron flux de 80 y 771 L/m^2h respectivamente.

En el caso de los modelos con 0,75% de agente generador de poros se sigue observando un alza significativa en el flujo de permeado obteniendo valores en un rango de 4000 a 4600 L/m^2h, además al igual que a 1 bar hay membranas que no generan resistencia hidráulica impidiendo que el sistema aumente la presión, como lo son el caso de M3, M9-2, M10-2, M15-2 y M16-2. Por otro lado, los modelos restantes (M4, M9-1, M10-1, M15-1 y M16-1) en esta ocasión generan resistencia permitiendo que la presión del sistema aumente y se mantenga constante durante la operación, pero solo hasta 1 o 1,5 bar. Este comportamiento se explica por el incremento en la presión de precarga del amortiguados de pulso. Al elevar la presión en la cámara del dispositivo, el diafragma ofrece mayor rigidez ante presiones bajas, reduciendo la amortiguación volumétrica y dirigiendo la totalidad del caudal suministrado por la bomba hacia la celda tangencial (Carcaré & Cortina, 2022). A su vez, esta mayor eficiencia hidráulica y la fuerza ejercida sobre la membrana pueden inducir una compactación en la estructura polimérica, reduciendo sutilmente el tamaño de los poros. Como consecuencia, la resistencia hidráulica del sistema aumenta, permitiendo alcanzar y mantener los niveles de presión que antes no se registraban (Hung et al., 2022).

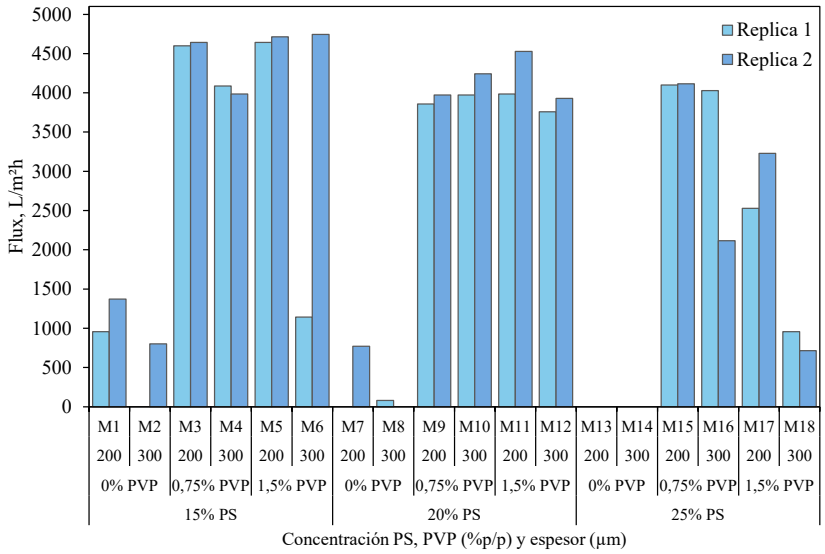


Figura 11. Flujo de permeado de membranas sin soporte a 3 bar.

De las membranas fabricadas con 1,5% PVP, para las concentraciones de 15% PS y 20% PS se repite el comportamiento operativo observado a 1 bar donde solo M6-1 genera la resistencia adecuada para operar y mantener el sistema a 3 bar, obteniendo un flux de 1143 L/m^2h y en esta ocasión M12-1 alcanza una presión de 0,5 bar presentando un el flux sobre los 3000 L/m^2h, sin embargo, esto se explica debido al aumento de la presión de la precarga del amortiguador y de una posible compactación estructural que disminuye el tamaño de los poros.

Finalmente, respecto al espesor se observa que hay casos en donde el comportamiento ocurrido a 1 bar se mantiene, como lo que sucede con las fabricadas con un 25% PS y 1,5% PVP y entre M5 y M6, en donde las membrana de 300 µm presenta una disminución de aproximadamente 2000 L/m^2h y de más 1500 L/m^2h respectivamente, obteniendo un menor flux con 300 µm. En contraparte, algunos caso se ven desfavorecidos con el aumento de la presión, ya que la diferencia entre los valores de flux obtenido entre un espesor de 200 y 300 se ve disminuida, como sucede entre M3 y M4.

En la última prueba de rendimiento efectuada a 5 bar, a partir de la Figura 12 se observa que las membranas fabricadas con un contenido de 15% PS mantienen el comportamiento presentado a 3 bar, en donde M2-1 no obtiene permeado, M1-2, M2-2 y M6-1 operan correctamente obteniendo flux de 1443, 1157 y 2186 L/m^2h respectivamente, y los demás modelos con 0,75% y 1,5% de PVP no generan resistencia hidráulica o alcanzan presiones de 1 bar como consecuencia de la compactación. Sin embargo, se puede notar que para estos casos el flux que se obtuvo disminuyo en un rango de 100-500 L/m^2h aproximadamente. Por último, las membranas fabricadas con una concentración de 20% y 25% PS no presentan diferencias significativas respecto al comportamiento y a los valores obtenidos a 3 bar, destacando únicamente a M17-2 y M18-2 que aumentan el flux con respecto a la operación a 3 bar, obteniendo valores de 4071 y 1243 L/m^2h, y a M18-1 que a diferencia de los otros casos presenta una disminución del flux a 329 L/m^2h.

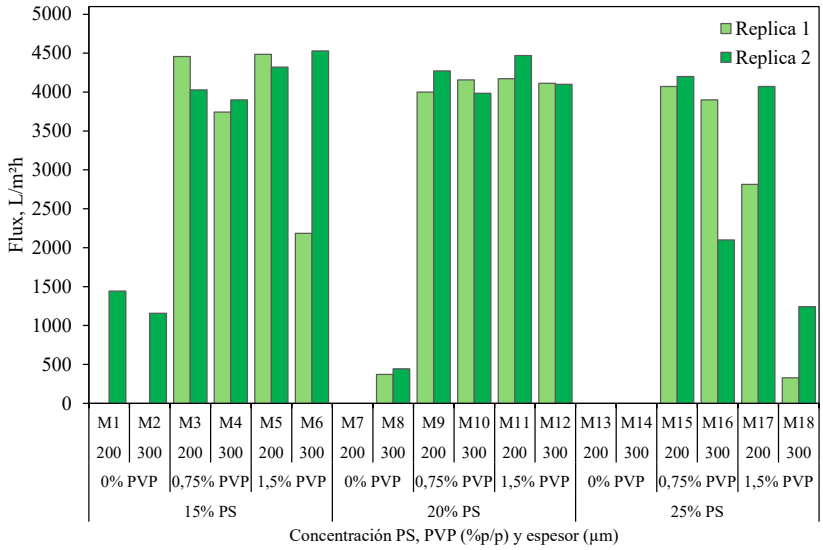


Figura 12. Flujo de permeado para membranas sin soporte a 5 bar.

Por último, en cuanto al espesor el comportamiento sigue la tendencia observada a 3 bar, ya que los modelos que presentan una diferencia significativa en cuando a flux por efecto del espesor corresponden a M5-1 y M6-1, M15-2 y M16-2, y M17 con M18 para ambas replicas, siendo el modelo de 300 µm el cual obtiene un flux menor.

Finalmente, en la Figura 13 se presenta la permeabilidad al agua de las membranas a las presiones aplicadas de 1, 3 y 5 bar, de ella se puede observar que en la mayoría de los casos las membranas sufren una compactación de su estructura, ya que la permeabilidad disminuye considerablemente

a presiones de 5 bar. Sin embargo, algunos modelos se ven alterador en menor medida como M1, M2, M7 y M18.

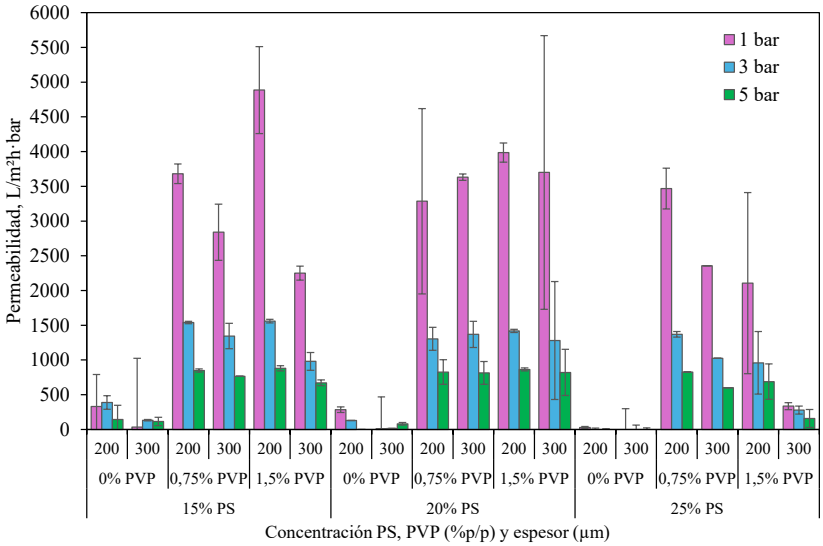


Figura 13. Permeabilidad al agua de membranas a diferentes condiciones de diseño.

En publicaciones similares, se han reportado rendimientos variados en lo que respecta a la permeabilidad. El año 2017 Garcia-Ivars et al., obtuvieron una permeabilidad de 180 $L/m^2h \cdot bar$ en membranas fabricadas mediante el método NIPS a partir de poliestireno de alto impacto reciclado (HIPS-R) con DMA como solvente, mientras que en el 2024 Mansor et al. reportaron permeabilidades entre 100-250 $L/m^2h \cdot bar$ para membranas fabricadas con EPS y 4 tipos de solventes, ambos semejantes a los valores obtenidos en esta investigación en membranas fabricadas sin aditivos como M1 y M7. Por otro lado, Santana-Luna et al. (2025) quienes fabricaron membranas con EPS y DMI como solvente, obtuvieron permeabilidades significativamente menores entre 0,05-4,83 $L/m^2h \cdot bar$. En el caso de membranas con PVP como aditivo, el año 2024 Sriani et al., quienes fabricaron membranas con EPS y NMP como solvente, obtuvieron valores de flujo de permeado de 449,7 $L/m^2h \cdot bar$ para membranas fabricadas con EPS puro, valor que incrementó hasta 970,5 $L/m^2h \cdot bar$ en membranas fabricadas con PVP. De igual manera Swefi et al. en el 2025, quienes fabricaron membranas a partir de polisulfona y PVP como agente generador de poros, reportaron un aumento de 320 L/m^2h a 345 L/m^2h a 0,5 MPa al añadir una concentración de 1,5 %p/p de PVP en la solución de moldeo. Ambos estudios presentaron valores y comportamientos similares a los obtenidos en esta investigación en modelos como M1, M6, M7 M17 y M18, los que se pueden explicar por el hecho de que la adición de una baja concentración de PVP favorece la formación de poros, resultando en flujos de permeado mayores.

En el caso de las membranas fabricadas con soporte mecánico se obtienen resultados desfavorables, ya que todas las membranas, sin importar la variación de su composición (PS, PVP o espesor), presentan exactamente el mismo flux masivo entre 4700 y 5100 L/m^2h, como se puede observar en la Figura 14, lo que indica que el agua no fue filtrada por la membrana polimérica, sino que pasó de forma directa a través del soporte mecánico. Este comportamiento se atribuye

principalmente a dos fenómenos, i) una penetración excesiva (*over-penetration*) de la solución de moldeo en la matriz textil y ii) una deficiencia en la adhesión interfacial. Por un lado, la solución de moldeo penetró de manera descontrolada todo el espesor de la tela no tejida, provocando que las fibras de poliéster afloraran por la capa superior, impidiendo la formación de una capa densa y continua de poliestireno. De manera simultánea, debido a que el poliéster es un material moderadamente hidrofóbico, a pesar de que la solución atraviesa por completo la tela, el PS no se logra adherir a las microfibras del tejido, por lo que al realizar la inmersión de la membrana en el baño de coagulación la película polimérica se desprende del poliéster, resultando en una superficie irregular y con macro canales que conectan la cara superior e inferior de la tela (Wang et al., 2024).

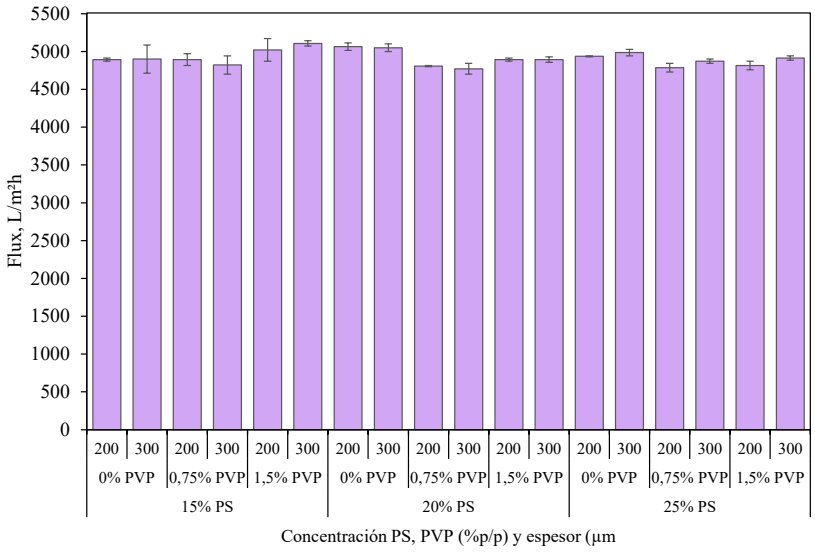


Figura 14. Flujo de permeado de membranas con soporte mecánico a 1 bar.

En el 2024 Wang et al., quienes fabricaron membranas a partir de diferentes polímeros (PSU, PAN y PEI) con NMP como solvente sobre un soporte mecánico de tela de poliéster, reportaron resultados de flujo de permeado entre 1140 a 2656 L/m^2h operando a 1 bar. Estos como consecuencia de poros de gran escala presentes en el soporte mecánico, que facilitaron la entrada o salida de la solución de moldeo al momento de formar la película, además, de irregularidades en la superficie del soporte que generó zonas de desprendimiento de la matriz polimérica. Este comportamiento es similar a los resultados obtenidos en este estudio y la diferencia en los flujos de permeado se debe principalmente al método de aplicación de película utilizado, ya que utilizaron un aplicador de película automático de doble cuchilla, en donde la primera cuchilla impregna la tela con la solución de moldeo y la segunda asegura una lámina uniforme al corregir vacíos e irregularidades. En el caso de este estudio, la aplicación se realizó de manera manual con un aplicador de una sola cuchilla, lo que pudo generar diferencias en el espesor a lo largo de la lámina e irregularidades en la superficie por la penetración de la solución en el soporte.

Debido a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a 1 bar las siguientes pruebas de permeabilidad a 3 y 5 bar, además de las pruebas de rechazo de sales y disminución de turbidez, solo se realizaron para las membranas fabricadas son soporte mecánico.

5.3.2. Rechazo de sales

Luego de las pruebas de permeabilidad, se realizaron pruebas de rechazo de sales, donde se empleó una solución salina (NaCl) de 2000 mg/L como flujo de alimentación y se operó a 3 bar. El análisis de los resultados se realizó a partir de la Figura 15 y Figura 16 que presenta los valores de permeabilidad (Γ) y del rechazo de sales (%R).

En términos generales se observa un rango de rechazo extremadamente bajo (0% - 4,5%), mientras que la permeabilidad mantuvo valores cercanos a los obtenidos en las pruebas de permeabilidad a 3 bar. Estas presentan el mismo comportamiento observado anteriormente, en donde solo algunas membranas logran operar a la presión deseada (3 bar), mientras que la mayoría no logra generar resistencia hidráulica, por lo que permite el paso completo del flujo hacia el permeado.

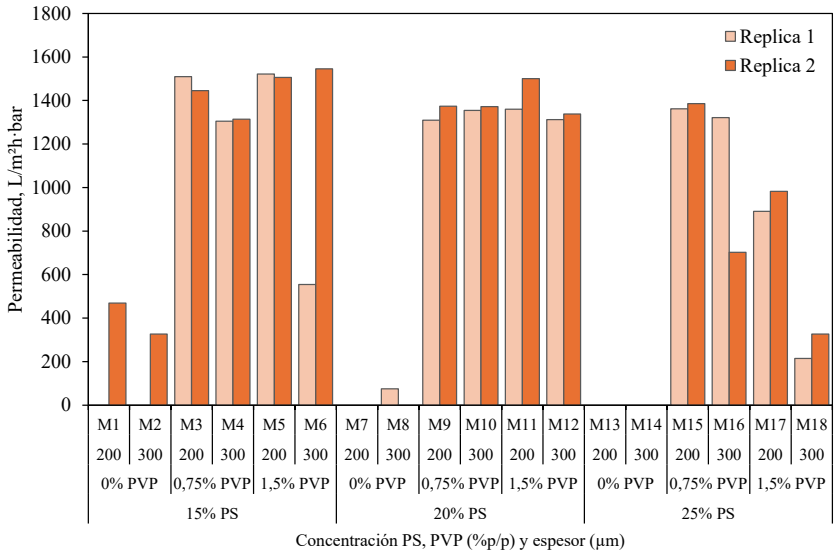


Figura 15. Permeabilidad de solución salina de membranas fabricadas sin soporte a 3 bar.

Al analizar la influencia de la concentración de polímero, se observa que las membranas de 15% PS presentan valores de rechazo detectables de un 3,7% para M1-2 y 1,3% para M2-2, sin embargo, al incrementar el polímero a 20% y 25% de PS, la capacidad de retención de sales cae prácticamente a cero en la mayoría de las muestras, esto como consecuencia de la ausencia de poros en la membrana.

Por otro lado, al añadir agente generador de poros se observa que las membranas de un 15% PS reportan un rechazo entre 0,5-4,5% siendo el más alto de M3-1 (0,75% PVP), mientras que para contenido de 20% y 25% de PS solo algunos casos aislados como M9-1, M11-1, M15-1 y M18 reportan rechazos de sales, pero menores a 1%. Esos resultados sugieren que la adicción del PVP genera poros o macro poros en la membrana, que no son capaces de retener partículas de sales.

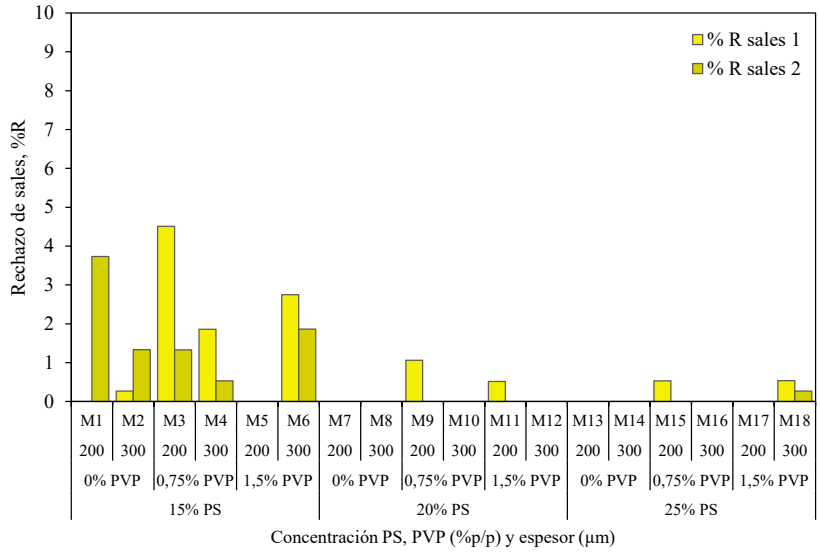


Figura 16. Resultados de rechazo de sales de membranas sin soporte mecánico a 3 bar.

Debido al rango de rechazo de sales tan bajo de 0% -4,5%, los resultados indican que las membranas fabricadas no poseen características de nanofiltración ni de osmosis inversa bajo las condiciones operativas de 3 bar, y estas actúan dentro del régimen de microfiltración o ultrafiltración de poro ancho. Si bien las condiciones de diseño no son adecuadas para procesos de desalinización o remoción de sales disueltas, existe la posibilidad de ser aplicadas en procesos de remoción de solidos en suspensión o separación de macromoléculas, priorizando el flujo de permeado

En la literatura se reportan diversos estudios, en donde el rechazo de sales o partículas de similar tamaño presenta una amplia gama de resultados. En el 2024 Yam-Cervantes et al., quienes fabricaron membranas con HIPS sulfatado, reportaron un rechazo de Na_2SO_4 y $MgSO_4$ de 5% y 20% respectivamente al operar con la membrana de control sin sulfonación, el cual aumentó 65% y 70% para la membrana con una sulfonación del 5% (R-HIPS-5), este aumento se atribuyó a un menor tamaño de poros que logró retener sales mono y divalentes, además gracias al proceso de sulfonación las membranas adquirieron una carga negativa mejorando aún más la retención. Así mismo en el 2024 Mansor et al., quienes fabricaron membranas con EPS y PVDF a distintas concentraciones, reportaron un rechazo de 40% para MB (Methylene blue) y de 36% para CR (Congo red) con la membrana de 100% EPS, el cual aumentó a un 90% y 84% para MB y CR respectivamente en el modelo 10/90 EPS/PVDF, resultados que se debe a una disminución del tamaño de poros por la presencia de un mayor contenido de PVDF. En comparación con los resultados obtenidos, solo uno presenta valores cercanos, pero en la mayoría de los casos existe una diferencia significativa incluso para las membranas que fueron fabricadas exclusivamente con EPS, sin embargo, es importante considerar que el tamaño de las moléculas de los compuestos utilizados en los estudios son el doble e incluso hasta diez veces más grandes que la molécula de la sal común (NaCl; 58,44 g/mol), lo que permitió una mejor retención.

5.3.3. Disminución de turbidez

A partir de los datos experimentales de flujo de permeado (J) y de disminución de turbidez (%τ) presentados en las Figura 17 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el rendimiento de las membranas en la remoción de turbidez, bajo una presión de operación de 3 bar y una concentración de alimentación de caolín de 500 mg/L, evidencia patrones claros según las condiciones de diseño de la membrana. En términos generales, para las membranas que presentaron flujo de permeado, los valores de rechazo se mantuvieron en un rango de bajo a moderado, oscilando entre 9,9% y 32%. A nivel general el flux se ve disminuido en comparación a la pruebas de rendimiento con agua destilada, lo que sugiere que las membranas presentan ensuciamiento debido a la deposición de caolín en su superficie, además, cabe destacar que las membranas M7, M8, M13 y M14 no mostraron flujo de permeado, resultando en un rechazo nulo del 0%.

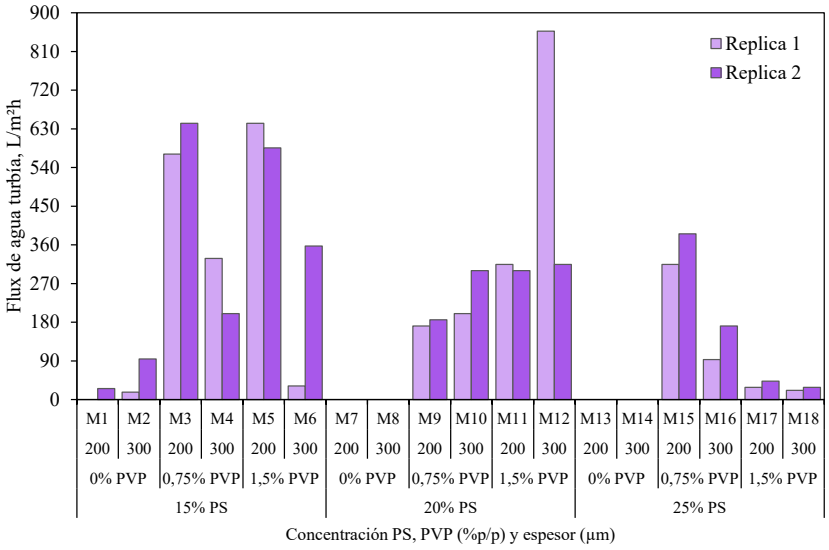


Figura 17. Permeabilidad de solución de caolín de membranas sin soporte a 3 bar.

La concentración del agente generador de poros PVP, ejerce un impacto directo sobre la estructura porosa y la retención. En las membranas fabricadas con un 15% de PS, la ausencia de PVP permitió alcanzar los porcentajes máximos de rechazo con M2 (30% replica 1 y 34% replica 2), sin embargo, al incorporar 0,75% de PVP el rechazo disminuye a un promedio aproximado de 23%-24% (M3 y M4) y al elevar el PVP a 1,5% (M5 y M6), la retención se desploma significativamente, llegando solo a un 13% en M5 y un mínimo de 3% para M6-2. Esto ocurre porque la combinación de baja concentración de polímero con alto contenido de aditivo crea macro poros excesivamente abiertos e interconectados que dejan pasar libremente la suspensión de caolín. Lo cual también se ve reflejado en el flux, ya que para ambas réplicas de M2 obtienen valores bajos de 17 y 94 L/m^2h, mientras que para M5 aumenta a 643 y 586 L/m^2h.

Al aumentar la concentración de polímero a un 20%, al tener una matriz más concentrada compensa la apertura de poros generada por la PVP. Con 0,75% de PVP (M9 y M10), los rechazos se mantienen estables entre 22% y 29%. Al subir la PVP a 1,5%, M11-2 mantiene un rechazo en el rango anterior mientras que M11-1 disminuye a un 14%, pero en el caso de M12 logra un rechazo

mayor de 30% y 31% y obtiene un flujo de permeado de 857 y 314 L/m^2h, encontrándose estos último en el rango teórico de los procesos de microfiltración, demostrando que con un 20% de PS se logra una morfología porosa optima donde se generan poros uniformes sin perder integridad estructural.

Con un alto contenido de polímero (25% PS), la adición de 0,75% de PVP (M15 y M16) mantiene rechazos entre un 20%-23% además de permeabilidades en rangos de 30 a 130 L/m^2h. Al aumentar la PVP a 1,5%, M18 mantiene un rechazo aproximado de 23% pero presenta una baja significativa en la permeabilidad llegando a 7 y 10 L/m^2h, mientras que M17 obtiene mejores resultados, ya que alcanza rendimientos de 30% y 32% pero de igual manera baja su permeabilidad a 10 y 14 L/m^2h.

En cuanto al espesor de la película se encuentran diferentes casos sobre como impacta en los resultados obtenidos, en primer lugar, las membranas fabricadas con 15% de PS y sin aditivo, la membrana más delgada (M1) mostró un desempeño deficiente, la réplica 1 se encontraba rota desde las pruebas de permeabilidad con agua y la réplica 2 apenas alcanzar una remoción del 10%. En cambio, al aumentar el espesor a 300 µm (M2) el rechazo aumentó a valores de 30% y 34%, demostrando que esos 100 µm adicionales son críticos para retener las partículas suspendidas de caolín en ausencia de agente generador de poros. Luego, en los modelos con una concentración de 20% de poliestireno y 1,5% de PVP, el rechazo para M11 (200 µm) oscila entre 14% y 24%. Al pasar a M12 (300 µm) la retención da un salto fijándose en 30% y 31%, ya que un mayor espesor estabiliza la red de macroporos generada por la adición del agente generador de poros. Por último, para las membranas de 25% PS y 1,5% PVP se observa un excepción a lo ocurrido en los otros casos, ya que M17 (200 µm) supera a M18 (300 µm), logrando un rechazo de 30%-32% frente a 21%-25% de M18. En matrices con un alto contenido de polímero suelen resultar en estructuras mucho más compactas y densas, por lo que la disminución del espesor contrarresta este efecto, favoreciendo la formación de poros funcionales sin una resistencia excesiva de las capas superiores.

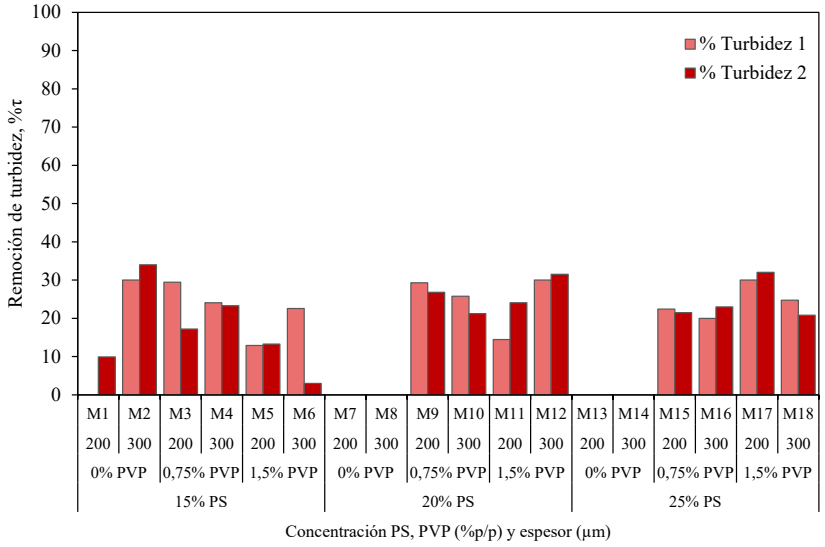


Figura 18. Resultados de disminución de turbidez de membranas sin soporte a 3 bar.

Finalmente, el análisis integrado de las variables evidencia que la retención de turbidez no depende de un solo parámetro, sino del balance entre la densidad de la matriz (PS), la porosidad generada (PVP) y el camino de filtración (espesor). En donde las membranas M2 (15% PS, 0 PVP, 300 µm), M12 (20% PS, 1,5% PVP, 300 µm) y M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) destacan como las más equilibradas entre $\%\tau$ y J. La densidad del PS evita que la PVP genere canales en exceso, garantizando rechazos superiores al 30% y manteniendo alta resistencia a la deformación bajo presión.

En el 2024 Sriani et al., quienes fabricaron membranas de EPS con diferentes contenidos de PVP, realizaron estudios de remoción con dos tipos de algas de diferentes tamaños, en donde todos los modelos de membranas reportaron una remoción de casi el 100% para la *Spirullina* (300-500 µm) y de un 50% para la *Chlorella vulgaris* (2-10 µm). De igual manera el 2024 en otro estudio de Sriani et al. en donde fabricaron membranas de EPS con poliamida (PI) como aditivo, realizaron estudios de remoción con una solución con microplásticos (~7 µm) en donde obtuvieron una remoción de 75% para la membrana sin aditivo, y de un 85% para membranas con adición de PI. Por otro lado, en el 2026 Sureash et al., quienes fabricaron membranas de EPS con diferentes aditivos (PVP, TiO_2 y LiCl), realizaron pruebas de remoción a efluentes de una planta de productos químicos reportando para todos los modelos de membranas y para los diversos contaminantes (TSS, turbidez y color) una remoción mayor al 98%, indicando una alta efectividad en la retención de coloides y solidos suspendidos, además de reportar un flujo de permeado para el efluente entre 4 y 18 L/m^2h. Al comparar con los resultados obtenidos en esta investigación, los valores de flujo de permeado son similares para algunos caso, mientras que para otras membranas son mucho menores, pero ambos sugieren un ensuciamiento durante el proceso que genera un disminución del flujo. En cuanto a la remoción, solo el estudio de *Chlorella vulgaris* presenta valores cercanos, ya que esta microalga tiene tamaños de partícula cercanos al caolín (0,2-20 µm), lo que sugiere que el tamaño de poros de las membranas de este estudio se encuentra alrededor de los 0,2 µm.

5.4. Caracterización de las membranas

Las muestras que se analizaron en esta sección se seleccionaron en base a dos criterios: i) membranas que presentaron los mejores resultados de rendimiento, es decir, que operaron correctamente en las pruebas de permeabilidad a 1, 3 y 5 bar, logrando generar flujo de permeado además de mantener la presión del sistema durante el tiempo de operación, además de lograr rechazo de sales y disminución de turbidez, ii) simultáneamente permiten comparar el efecto de las variables de diseño (concentración de poliestireno, concentración de PVP y espesor). Las membranas seleccionadas se detallan en la Tabla 14 a continuación

Tabla 14. Membranas seleccionadas para caracterizar.

M4	M6	M13	M16	M17	M18
15% PS, 0,75% PVP, 300 µm	15% PS, 1,5% PVP, 300 µm	25% PS, 0% PVP, 200 µm	25% PS, 0,75% PVP, 300 µm	25% PS, 1,5% PVP, 200 µm	25% PS, 1,5% PVP, 300 µm
					

5.4.1. FT-IR

El análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) se empleó para evaluar la pureza química de las membranas, la eficacia del proceso de fabricación al verificar la ausencia de trazas de d-limoneno, PVP y nuevos compuestos y el efecto de las variables de diseño (concentración de PS, concentración de PVP y espesor) sobre la estructura molecular. En la Tabla 10 presentada anteriormente, se detallan los enlaces y grupos funcionales característicos del poliestireno, d-limoneno y PVP, junto con el rango de longitud de onda esperado según bibliografía, que permiten comparar con los valores de las bandas de absorbancia obtenidas experimentalmente.

Al observar detalladamente los espectro FT-IR de las membranas M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm), M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm), M13 (25% PS, 0% PVP, 200 µm), M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm), M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) y M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm), presentes en la Figura 19, todas muestran de manera idéntica las señales moleculares del poliestireno.

En primer lugar, se observa una banda en 3025 cm^{-1} que se genera por la tensión de los enlaces C–H presentes en el anillo aromático, seguido de esto se distingue la tensión de los grupos $-CH_2-$ del esqueleto del polímero en las bandas 2921 y 2849 cm^{-1}. Por otro lado, se presentan las vibraciones de tensión de los dobles enlaces C=C del anillo aromático en los picos de absorbancia 1602, 1492 y 1451 cm^{-1}, en donde la banda 1492 cm^{-1} actúa como banda de referencia, ya que corresponde a una vibración exclusiva del anillo del esqueleto, a diferencia de la banda 1451 cm^{-1} que se superpone con las señales de los enlaces en flexión $-CH_2-$ y la banda 1602 cm^{-1} que está ligada a la simetría de la nube de electrones del anillo. En la región entre 1200 y 900 cm^{-1} se pueden apreciar varias señales de baja intensidad destacando bandas como 1067, 1027 y 905 cm^{-1} que corresponden a flexiones en el plano de los enlaces C–H del grupo fenilo. También, se observan los picos de absorción más intensos del espectro en 749 y 695 cm^{-1} que corresponden a la flexión fuera del plano de los 5 hidrógenos enlazados al anillo y, por último, se aprecia el pico de absorción en 537 cm^{-1} que corresponde a la flexión fuera del plano del grupo fenilo (Colthup et al., 1990; Nakanishi, 1962).

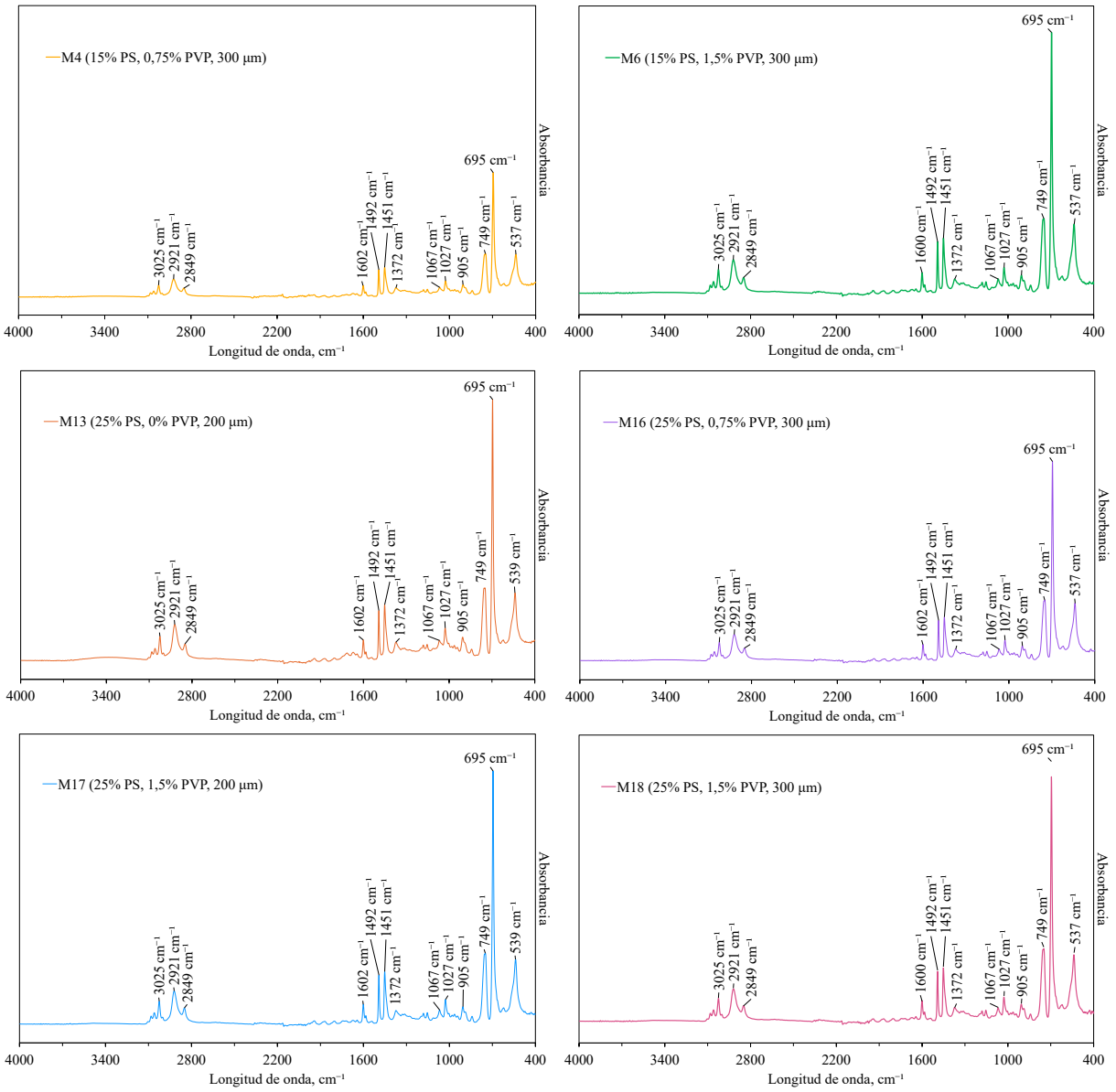


Figura 19. Espectro FT-IR de membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18.

Los espectros obtenidos exhiben un comportamiento consistente con los perfiles reportados por Huhn-Ibarra et al. (2025) que fabricaron membranas a partir de poliestireno expandido reciclado y Garcia-Ivars et al. (2017), quienes utilizaron poliestireno de alto impacto comercial y reciclado, los cuales se pueden observar en la Figura 20.

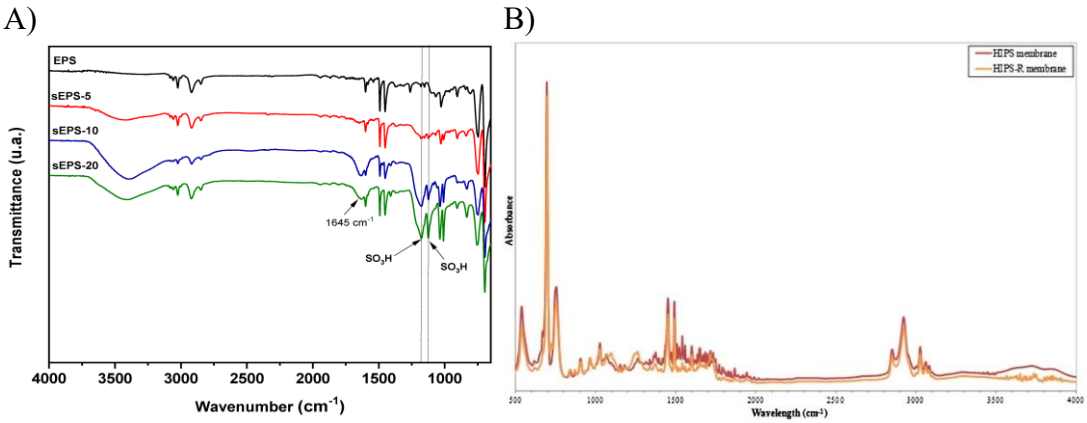


Figura 20. Espectros FT-IR reportados por A) Huhn-Ibarra et al. (2025) y B) Garcia-Ivars et al. (2017)

En lo que respecta al solvente d-limoneno, este presenta dos bandas de absorbancia características que corresponden a la tensión del doble enlace C=C exocíclico (fuera del anillo) que tiene una vibración muy limpia cerca de 1645 cm^{-1} y a la flexión fuera del plano del alqueno terminal $=CH_2$ que genera un pico robusto y agudo en los ~885 cm^{-1}. Al observar los espectros de las membranas (M4, M6, M13, M16, M17 y M18) en la región de 885 cm^{-1} se observan picos cercanos, que corresponden a las flexiones en el plano del esqueleto del poliestireno, pero no se aprecia un pico agudo en el número de onda como tal, por otro lado, en la zona de 1670-1645 cm^{-1} se aprecia una línea base con alteraciones mínimas, pero no un pico agudo detectable. La ausencia de señales demuestra de manera cualitativa que el proceso de evaporación del solvente y la posterior inversión de fases por inmersión en un baño de coagulación de agua fue eficiente, dado que la concentración de d-limoneno remanente se encuentra por debajo del límite de detección del accesorio ATR del equipo (< 0,1% p/p), condición ideal que asegura la estabilidad mecánica de las membranas y que evita la lixiviación del solvente durante los ensayos de permeabilidad.

Al comparar los espectros obtenidos con los resultados reportados por Zulfi et al. (2018) (Figura 21), quienes fabricaron membranas a partir de poliestireno de alto impacto reciclado y una mezcla de solventes de d-limoneno y DMF, se puede observar que estos presentan un comportamiento similar, con la presencia de picos de absorbancia característicos del poliestireno y ausencia de picos característicos del d-limoneno. Estos hallazgos sugieren que es posible obtener membranas libres de solvente y sin alteraciones de la matriz polimérica mediante el método NIPS.

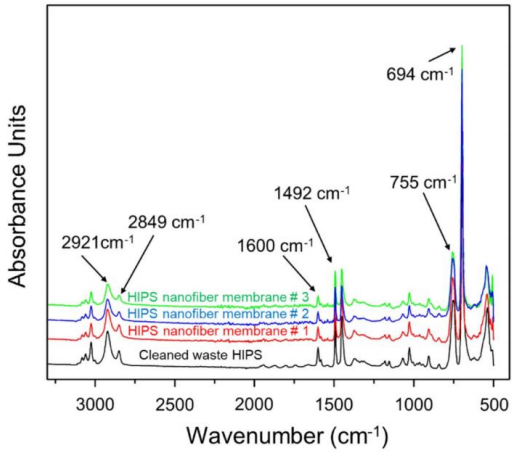


Figura 21. Espectro FT-IR reportado por Zulfi et al. (2018).

Por otro lado, la PVP se caracteriza por presentar una banda aguda e intensa entre 1680 y 1655 cm^{-1} generada por el grupo carbonilo C=O del anillo pirrolidona. Tomando el espectro de M13 como control ya que la membrana se compone puramente de poliestireno, al observar los espectros de M4 y M16 (0,75% PVP) y M6, M17 y M18 (1,5% PVP) no se aprecia la aparición de una banda notable o creciente en la zona ~1670 cm^{-1} para el grupo carbonilo y la sutil señal en 1602 cm^{-1} propia del poliestireno se mantiene sin distorsiones. Esto confirma que la PVP cumplió el rol de agente generador de poros, ya que, al ser un polímero altamente hidrofílico (soluble en agua), se disolvió correctamente durante el baño de coagulación, abandonando casi en su totalidad la matriz de poliestireno, quedando atrapada una fracción insignificante dentro de la estructura de la membrana.

Para evaluar más en detalle el impacto de la incorporación del agente generador de poros, en la Figura 22 se presentan los espectros de las membranas M13 (0% PVP) y M17 (1,5% PVP). En primer lugar, ambas muestras exhiben un perfil vibracional prácticamente idéntico correspondiente a la matriz del poliestireno, destacando la total ausencia de señales en la zona de 1680 a 1655 cm^{-1}, asociada a la tensión del grupo carbonilo (C=O) de la PVP pura, evidenciando que el aditivo se lixivia de manera eficiente en la inversión de fases, sin dejar trazas detectable en la estructura. Por otro lado, se puede observar una atenuación sutil en la intensidad de los picos de absorbancia en la zona de 1600 a 400 cm^{-1} de M17, esto se atribuye al efecto de la PVP, ya que su remoción de la matriz genera una estructura microporosa, que disminuye la densidad de las cadenas de poliestireno, por ende, la interacción con el haz de luz infrarroja.

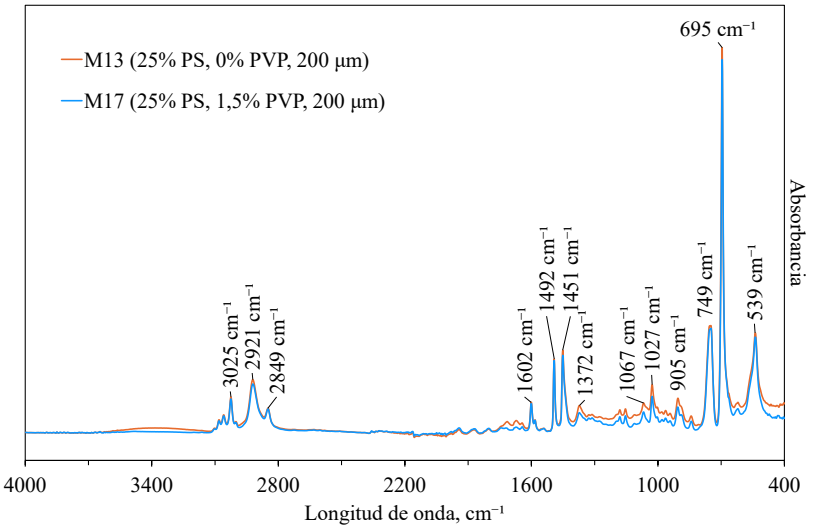


Figura 22. Comparación de espectros FT-IR de membranas M13 y M17.

En la Figura 23 se presentan los espectros del PVP puro y de las membranas fabricadas con EPS y distintos contenidos de PVP (0, 0,5 y 0,75 %p/p) reportados por Arrosyid et al. (2023) y los espectros de membranas de polisulfona con distintos aditivos (PVP, GO y Ag) reportados por Swefi et al. (2025). A partir de ellos se puede observar que, a diferencia de los resultados obtenidos en esta investigación, ambos estudios reportaron la presencia del PVP en la estructura de las membranas, en picos de absorbancia típicos como 3444 y 1665 cm^{-1}. Estos hallazgos, corroboran la ausencia de remanentes de PVP en la matriz polimérica, lo que sugiere un correcto funcionamiento del proceso de inversión de fases.

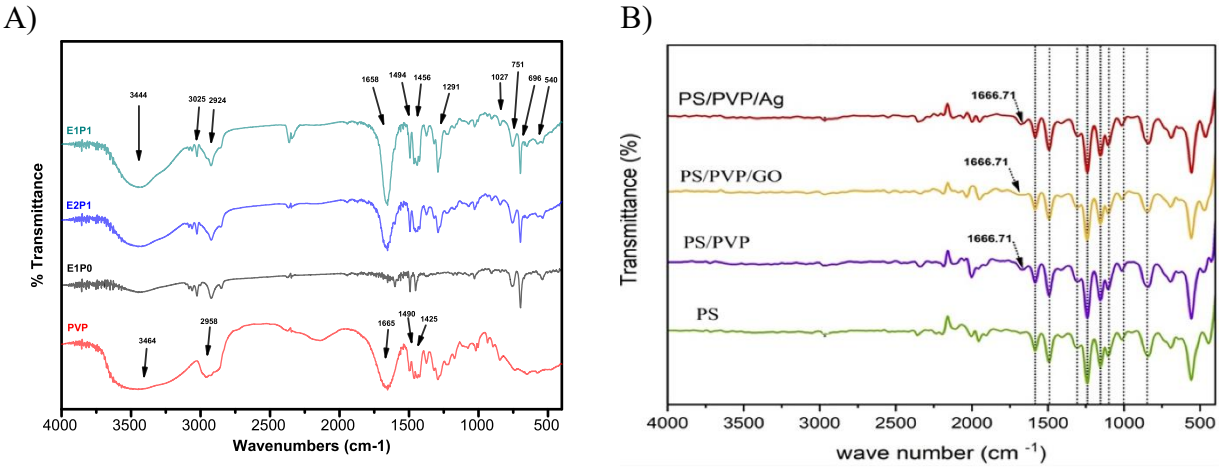


Figura 23. Espectros FT-IR reportados por A) Arrosyid et al. (2023) y B) Swefi et al. (2025).

Por otro lado, para analizar el efecto de la concentración de polímero (PS), se definieron dos casos de estudio, uno con baja concentración de aditivo (M4 y M16, 0,75% PVP) y uno con alta concentración (M6 y M18, 1,5% PVP). En la Figura 24 se presentan los espectros FT-IR de M4 (15% PS) y M16 (25% PS) y los espectro FT-IR de M6 (15% PS) y M18 (25% PS). De ellos se aprecia que los picos de absorbancia de todas las muestras coinciden exactamente en las mismas

longitudes de onda, destacando el doblete característico de las flexiones fuera del plano de los C-H aromático y las tensiones del doble enlace C=C. Esto demuestra que, a pesar del cambio en la relación soluto/solvente de la solución, no existen alteración en los modos de vibración molecular ni se generan nuevos enlaces covalentes, confirmando la reproducibilidad del proceso y la estabilidad estructural de la matriz polimérica.

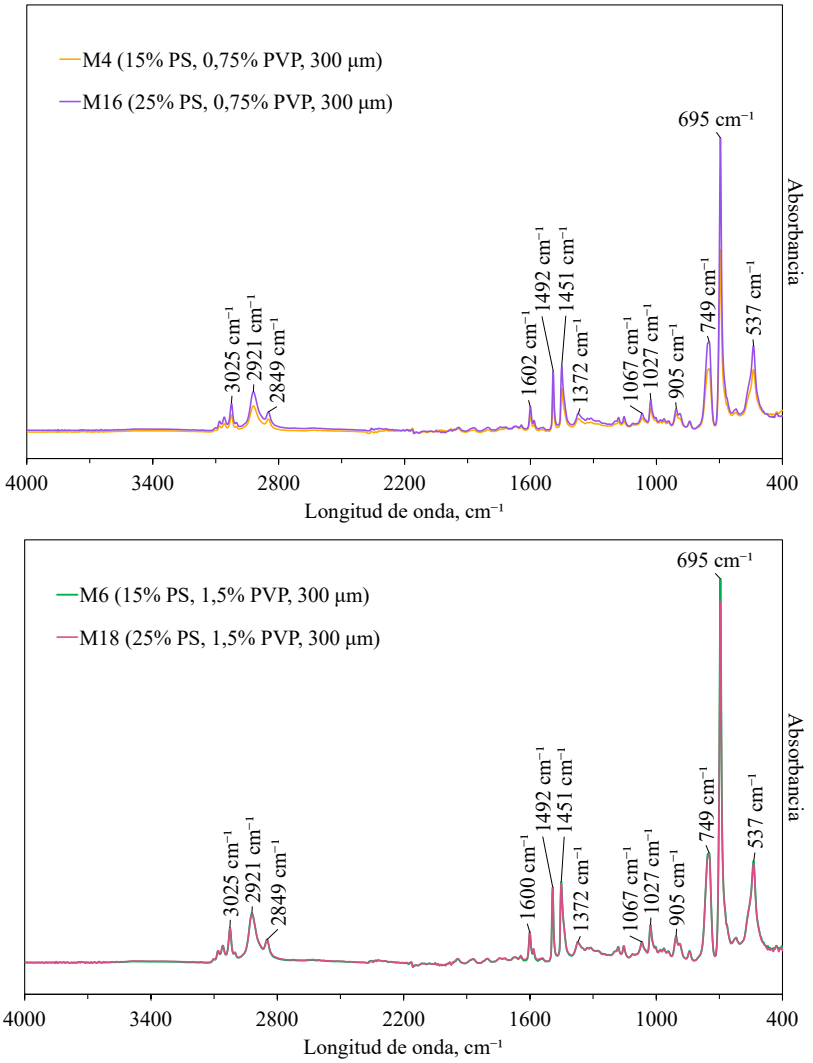


Figura 24. Comparación de espectros FT-IR de las membranas; M4 y M16, M6 y M18

También, es importante destacar la ausencia de la banda de tensión del grupo carbonilo (C=O) entre 1680 y 1655 cm^{-1} característica de la PVP pura, en todos los espectros, evidenciando que incluso al duplicar la concentración del agente generador de poros, este se logra remover a concentraciones traza menores del 0,1% durante la inversión de fases.

Por último, se puede observar que los espectro de M4 y M16 presentan una menor intensidad de absorbancia en comparación a M17 y M18. Esta variación se atribuye a la diferencia de concentración inicial de PVP, ya que a mayor concentración (1,5%) se incrementa la velocidad y el volumen de extracción del aditivo durante el intercambio de fases, generando una compactación

de la matriz polimérica que se traduce en una capa activa más densa y continua. Por el contrario, a una menor carga de PVP (0,75%) la matriz se reorganiza de manera gradual, resultando en una superficie menos compacta que finalmente absorberá menos luz durante el análisis ATR.

En cuanto al efecto del espesor de la película polimérica, en la Figura 25 se presentan los espectros de M17 (200 µm) y M18 (300 µm). Como se puede apreciar, ambos perfiles se superponen casi en su totalidad, presentando bandas de absorbancia idénticas en intensidad y longitud de onda demostrando que el espesor de la membrana no genera variaciones en los grupos funcionales.

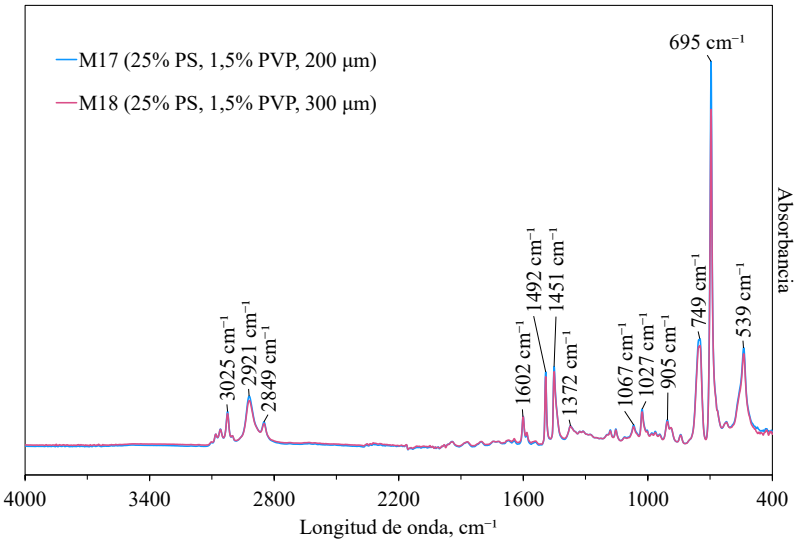


Figura 25. Comparación de espectros FT-IR de membranas M17 y M18.

Finalmente, a partir de los espectros FT-IR se confirmó la correcta remoción del solvente d-limoneno y del agente generador de poros PVP durante el intercambio de fases del baño de coagulación, además de la calidad de la matriz polimérica compuesta únicamente por poliestireno. En lo que respecta a las variables de diseño, la concentración de polímero y el espesor de la membranas no son significativas en la estructura molecular de la membrana.

5.4.2. Morfología

La morfología de las membranas se estudió a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM), para ello se obtuvieron micro imágenes tanto de la superficie como de la sección transversal de la membrana en dos zonas, con el fin de comprobar si hubo formación de poros en la estructura.

A partir de las micro imágenes SEM a una magnificación de 250x de la superficie de las membranas M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm), M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm), M13 (25% PS, 0% PVP, 200 µm), M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm), M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) y M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm) presentes en la Figura 26, se pueden observar diferencias morfológicas muy claras en cuanto a su topografía y porosidad superficial de la capa activa o *skin layer*. La membrana sin agente generador de poros (M13) presenta una superficie lisa y compacta, sin embargo, cuando se agrega PVP se puede observar como la superficie se modifica, para una concentración de 0,75% PVP (M4 y M16) la superficie presenta la aparición de poros, pero muy separados entre sí. Al aumentar el contenido de PVP a 1,5% (M6, M17 y M18), la superficie

presenta una estructura heterogénea, con poros superficiales de distintos tamaños y cavidades con profundidades que sugieren canales a través de la membranas.

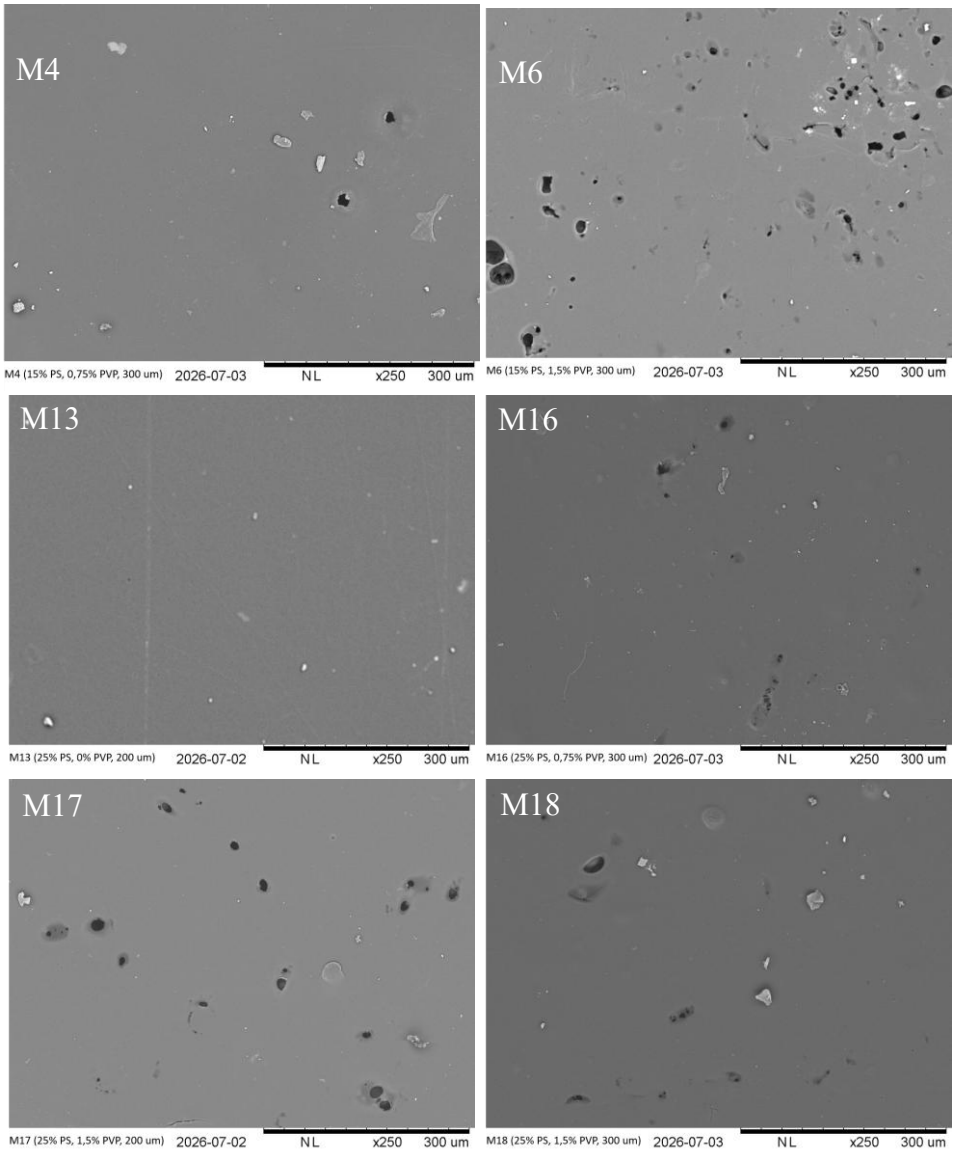


Figura 26. Imágenes SEM de la superficie de las membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18 a una magnitud de x250.

Si observamos con mayor detalle las micrografías SEM de la superficie de las membranas M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm) y M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm) en la Figura 27, ambas presentan una estructura predominantemente rugosa y con presencia de poros en su superficie, en donde la membrana con menor cantidad de poliestireno (M6) pareciera presentar una mayor cantidad de poros a lo largo de su estructura. Sin embargo, si se observa la superficie a una magnificación de x4,0k se logra apreciar una clara diferencia en el tamaño de poros que presenta cada membrana, a una menor concentración de poliestireno (M6) el diámetro de los poros se encuentra en una escala de 10 a 20 µm, mientras que en M18 además de macro poros, se notan

pequeñas “manchas” grises como puntos, que pueden corresponden a poros con diámetros en la escala de nm.

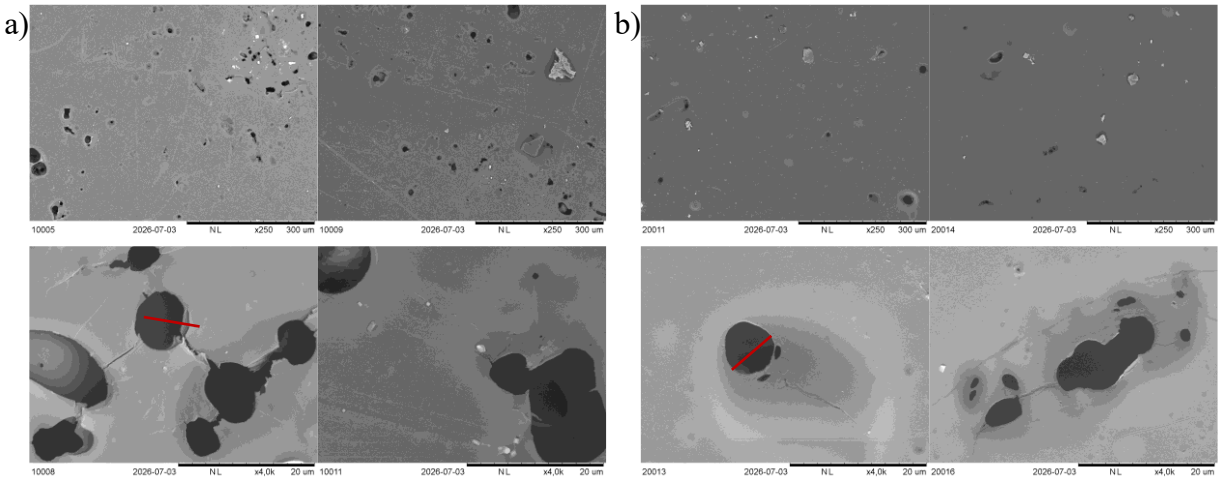
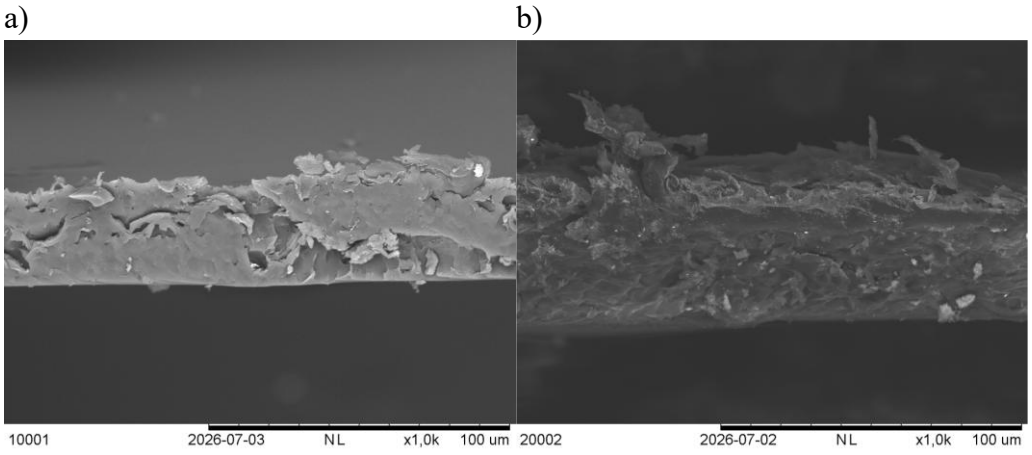


Figura 27. Imágenes SEM de la superficie de las membranas a) M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm) y b) M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm), en dos zonas distintas a magnificaciones de x250 y x4,0k de arriba hacia abajo.

La diferencias presentadas en la capa superficial de las membranas también se puede apreciar en la sección transversal de ellas (Figura 28), en donde M6 presenta la formación de macro huecos (*macrovoids*) prominentes que atraviesan una parte significativa de la membrana, resultando en zonas con paredes poliméricas delgadas alrededor de los poros, además de una capa superior muy fina que se encuentra conectada a las grandes cavidades inferiores. En contra parte, M18 presenta una estructura interna mucho más densa y continua, ya que, aunque el contenido de PVP sea alto, la concentración de polímero previene la formación de macro huecos o cavidades, dando paso a la formación de una subcapa esponjosa (*sponge-like structure*) con poros interconectados más pequeños y bien distribuidos.



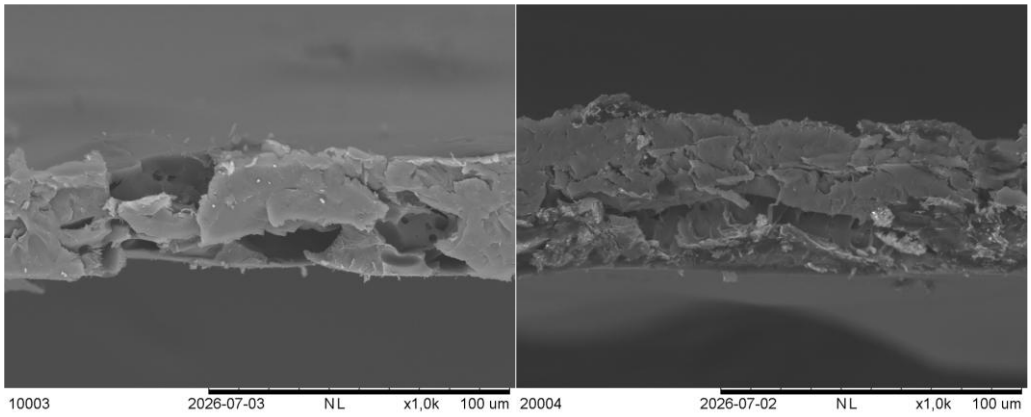


Figura 28. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas a) M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm) y b) M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm), en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k.

El efecto de la concentración también se puede apreciar entre los modelos de 0,75% de PVP y 300 µm, al observar la Figura 29 M4 (15% PS) presenta una superficie heterogénea con defectos y residuos dispersos, además de porosidades visibles a baja resolución (x250), al acercase se revelan cavidades de gran tamaño del orden de los 10 a 20 µm. Por otor lado, M16 (25% PS) muestra una superficie mucho más lisa, uniforme y continua, con menos imperfecciones o defectos a simple vista. Las imágenes con mayor magnitud exhiben una matriz polimérica con presencia de poros bien definidos y redondeados en una escala alrededor de 1 a 5 µm, además de cavidades de mayor tamaño rodeadas de pequeñas gritas o rugosidad a su alrededor producto del intercambio de fases durante el baño de coagulación.

a) b)

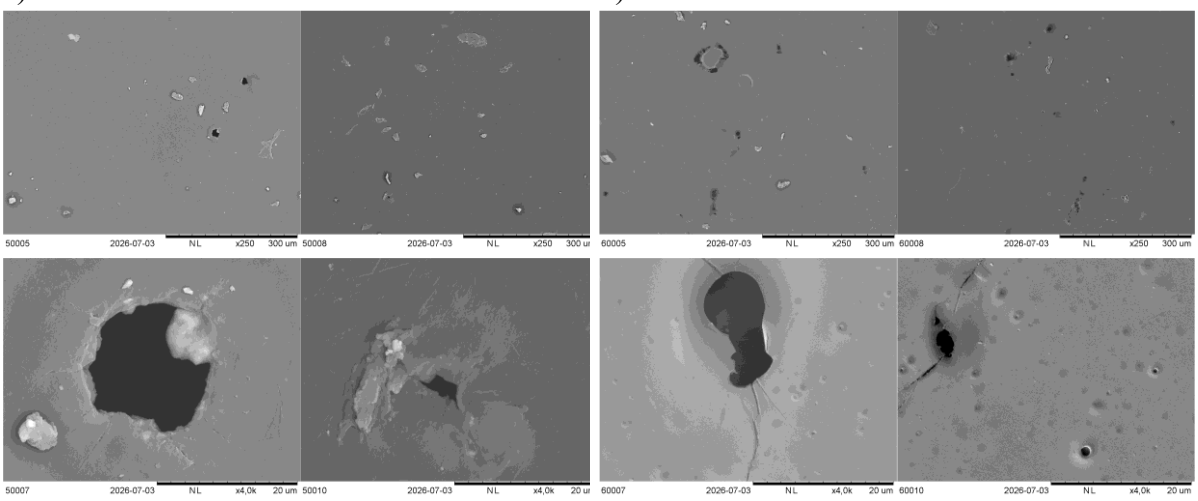


Figura 29. Imágenes SEM de la superficie de las membranas a) M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm) y b) M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm), en dos zonas distintas a magnificaciones de x250 y x4,0k de arriba hacia abajo

Al observar la Figura 30, se puede apreciar también una clara diferencia en su estructura interna, M4 muestra una sección transversal más delgada y homogénea, donde se aprecia una matriz de

poliestireno caracterizada por cavidades internas con macroporos bien definidos en el cuerpo de la membrana. La estructura además evidencia un intercambio de fases rápido lo que permitió la formación de poros interconectados, con una capa superficial relativamente delgada. Por otro lado, M16 presenta una sección transversal más sólida, continua y espesa en apariencia, la estructura interna se presenta mucho más compacta, con una capa superficial con un mayor contenido de polímero, resultando más gruesa y homogénea, y presentando una transición más suave hacía los macroporos presentes en el centro e y la parte inferior de la membrana.

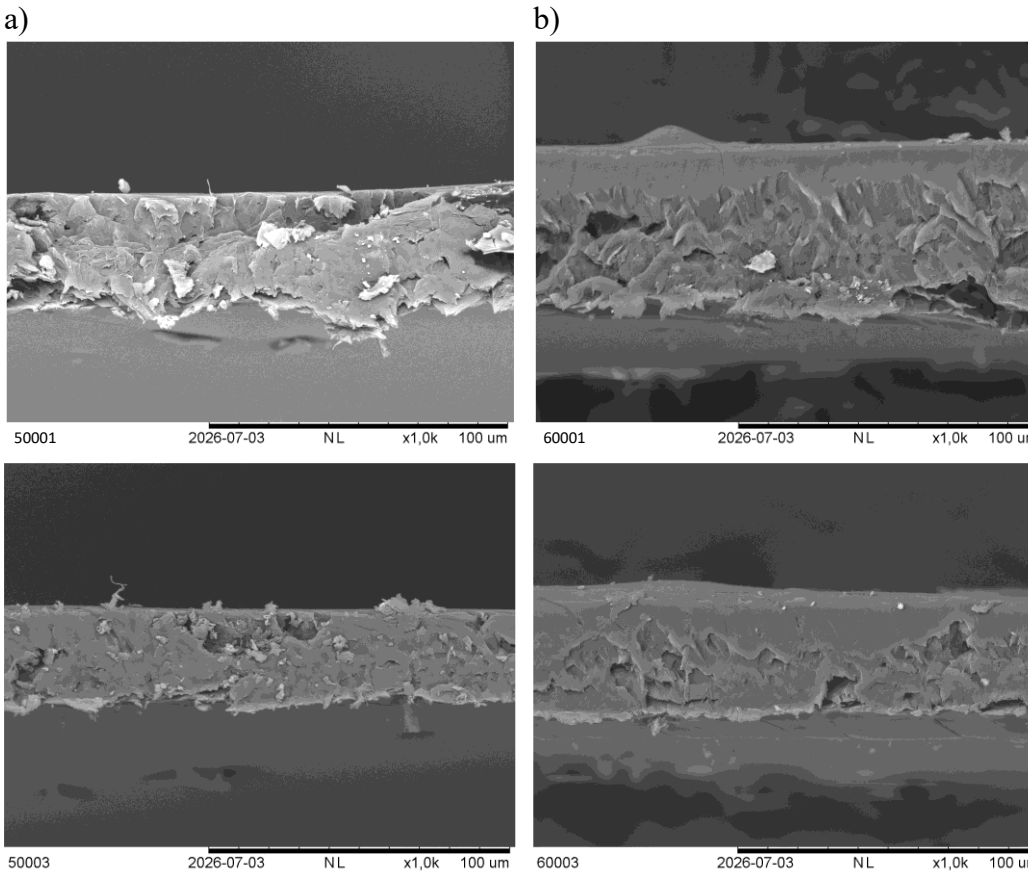
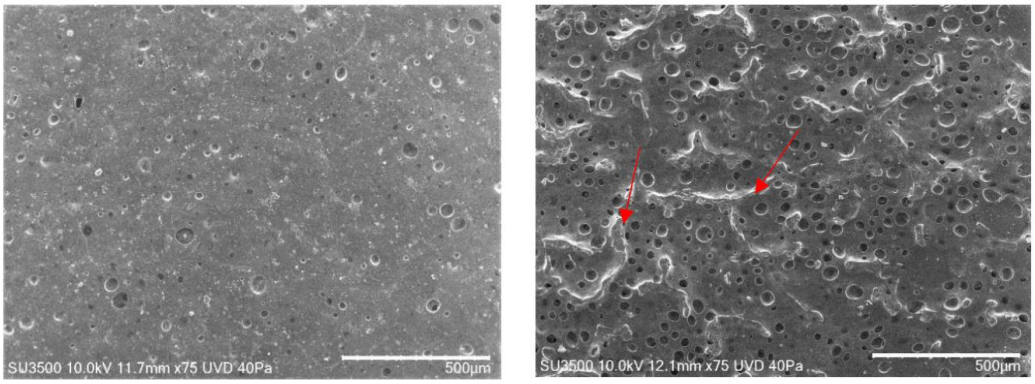


Figura 30. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas a) M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm) y b) M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm), en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k.

Al comparar con otros estudios, en el 2023 Dwi Nurherdiana et al., quienes fabricaron membranas de PS con DMF como solvente mediante el método de inversión de fases por inmersión en no-solvente y por evaporación, reportaron las micro imágenes SEM de la superficie de las membranas en presentes en la Figura 31, donde por inmersión en no-solvente obtuvieron diámetros de poros entre 10-40 µm, mientras que por evaporación fueron entre 26-46 µm. Estos resultados se alinean con los estudios de esta investigación, los cuales se pueden observar en las membranas fabricadas con PVP.



(a) **(b)**

Figura 31. Imágenes SEM de la superficie de las membranas fabricadas por (a) inmersión en no-solvente y (b) evaporación reportadas por Dwi Nurherdiana et al. (2023).

En lo que respecta al efecto de la concentración de agente generador de poros, en la Figura 32 se puede observar que M13 (0% PVP) presenta una superficie extremadamente lisa, continua y densa, donde no se aprecian poros o cavidades abiertas de gran escala. Al realizar el acercamiento, la matriz se observa sin porosidades abiertas, con la presencia de partículas aisladas (residuos y/o depósitos por manipulación) y poros diminutos (<2 µm) de manera muy puntual, confirmando que la película es predominantemente densa y no porosa. Al añadir PVP (M17) se evidencia su rol como agente generador de poros, resultando en una superficie con una distribución heterogénea de poros y cavidades a lo largo de toda la superficie, los que al observarse a mayor magnitud resultan en poros de gran diámetro, en el orden de 10 a 20 µm, y vacíos definidos, además de poros más pequeños (1 a 5 µm) interconectados hacía las subcapas internas de la membrana.

a) b)

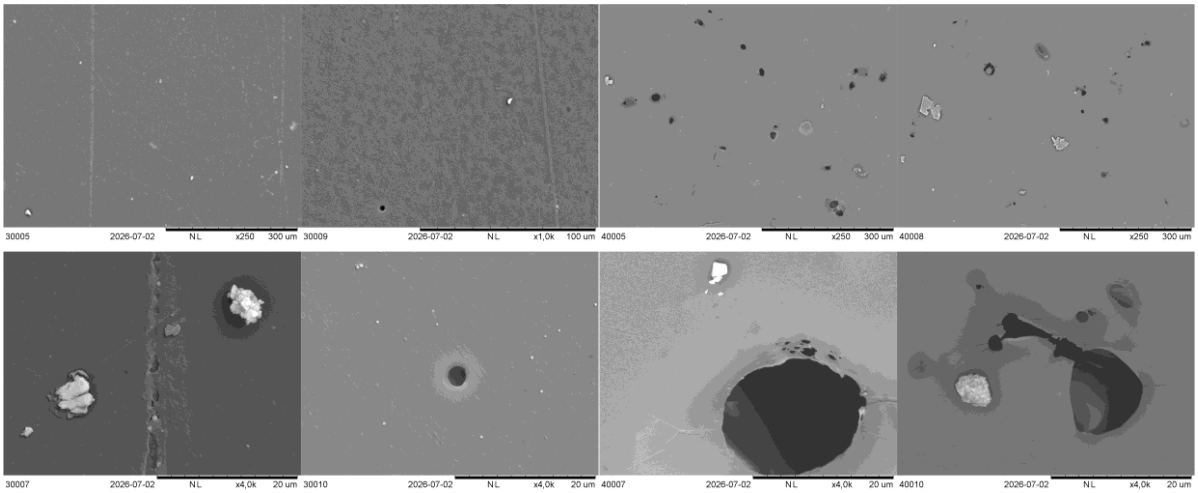


Figura 32. Imágenes SEM de la superficie de las membranas a) M13 (25% PS, 0% PVP, 200 µm) y b)M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm), en dos zonas distintas a magnificaciones de x250 y x4,0k, de arriba hacia abajo.

Al observar la sección transversal de las membranas en la Figura 33, se confirma la estructura densa y compacta de M13, presentando un aspecto uniforme y plano, característico de una separación de fases lenta debido a la ausencia del agente generador de poros, además de la ausencia de cavidades o macroporos. Mientras que M17 presenta formación de cavidades y macroporos en la capas internas de la membrana, pero manteniendo la formación de una subcapa esponjosa (*sponge-like structure*) al igual que M18, debido a la alta concentración de polímero.

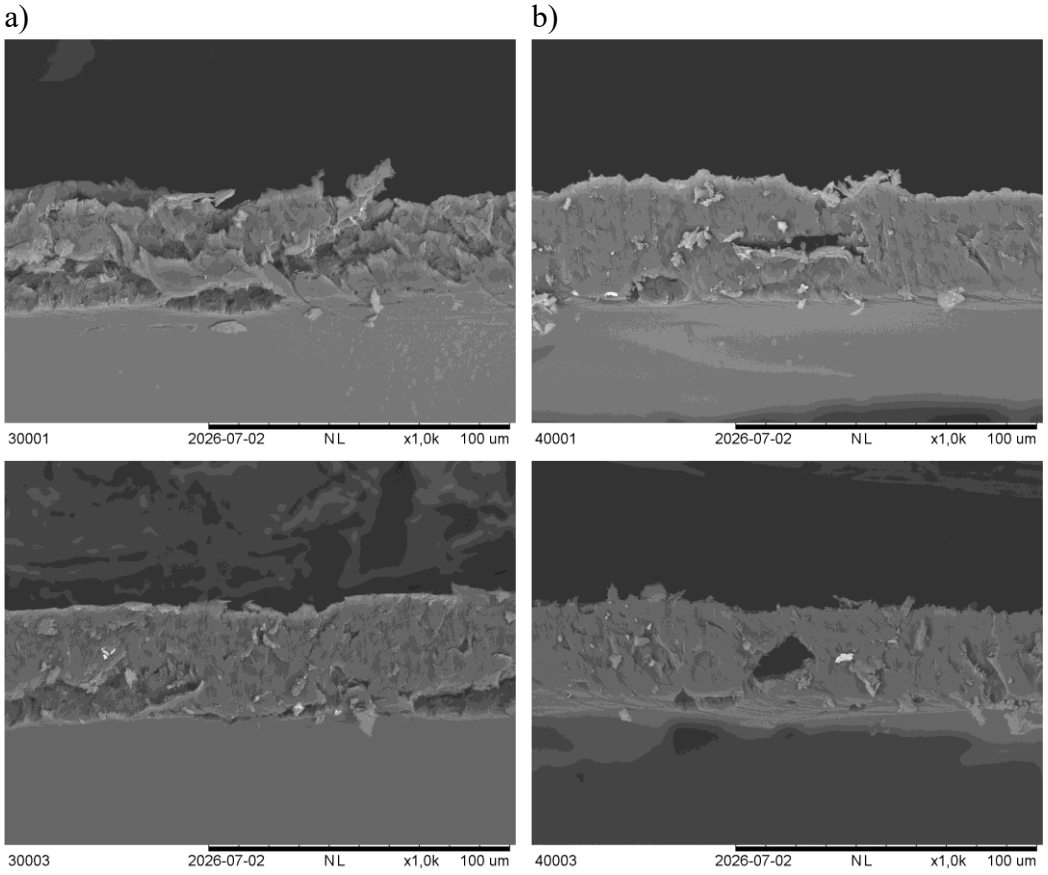


Figura 33. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas a) M13 (25% PS, 0% PVP, 200 μm) y b) M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 μm), en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k.

A partir de los resultados anteriores, se evidencia que el agente generador de poros, en este caso PVP, tiene un gran impacto en la estructura de las membranas, sobre todo en lo que respecta a la obtención de flujo de permeado, ya que de la pruebas realizadas anteriormente, M13 presentó flujos nulos durante su operación, mientras que M17 presentó permeabilidades de hasta 1300 $L/m^2h \cdot bar$.

En comparación con las imágenes SEM reportadas por Sriani et al. (2024) presentes en la Figura 34, se puede observar que a medida que se aumentó el contenido de PVP de un 0 a 8%, la superficie de las membranas presentó una mayor porosidad con diámetros de hasta 1 μm. Estos resultados presentan la misma tendencia que los obtenidos en esta investigación, aumentando la porosidad y tamaño de poros al añadir PVP en la solución de moldeo, sin embargo, existe una diferencia significativa en la magnitud del tamaño de los poros, la cual puede ser como resultado del uso de

diferentes solventes, ya que según lo reportado utilizan NMP, solvente tradicionalmente utilizado en la fabricación de membranas.

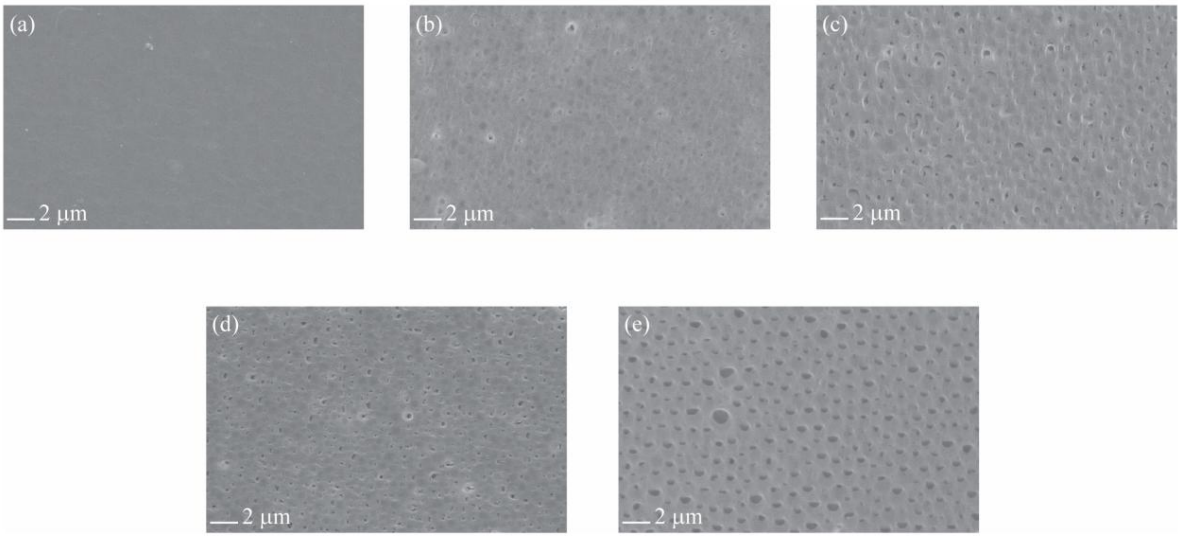


Figura 34. Imágenes SEM de la superficie de las membranas con diferente contenido de PVP: a) 0% PVP, b) 2% PVP, c) 4% PVP, d) 6% PVP y e) 8% PVP, reportados por Sriani et al. (2024).

De igual forma, al observar la Figura 35 donde se encuentran los resultados reportados de la sección transversal de las membranas, la de solo EPS presenta una gran cantidad de poros con tamaños menores a 5 µm, lo cuales aumenta al añadir PVP incluso desarrollando macro vacíos, resultados los cuales se asemejan a los obtenidos.

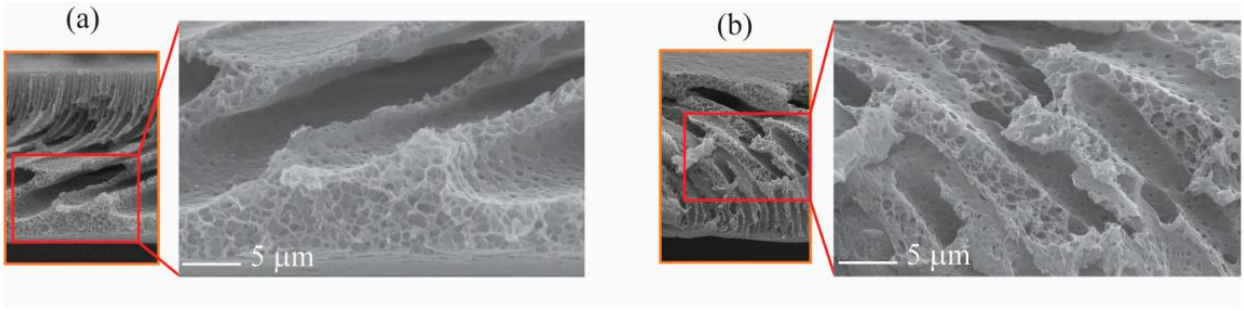


Figura 35. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas con a) 0% PVP y b) 2% PVP reportadas por Sriani et al. (2024).

Por último, en lo que respecta al efecto que tiene el espesor de la película, en la Figura 36 se pueden observar los modelos diseñados con una concentración de 25% PS y 1,5% PVP, en donde M17 se fabricó con un espesor de 200 µm y M18 con un espesor de 300 µm. A simple vista no se presenta una gran diferencia en su estructura, y no afecta mayormente en lo que respecta a la formación de poros, pero si se puede observar una pequeña diferencia en el espesor final de las membranas, ya que durante el proceso de intercambio de fases sufren un encogimiento de la matriz debido a la pérdida de masa por la salida del solvente y el agente generador de poros. Al analizar la imagen según la escala entregada por el SEM se obtiene que M17 presenta un espesor aproximado de 40 µm, mientras que M18 un espesor aproximado de 55 µm.

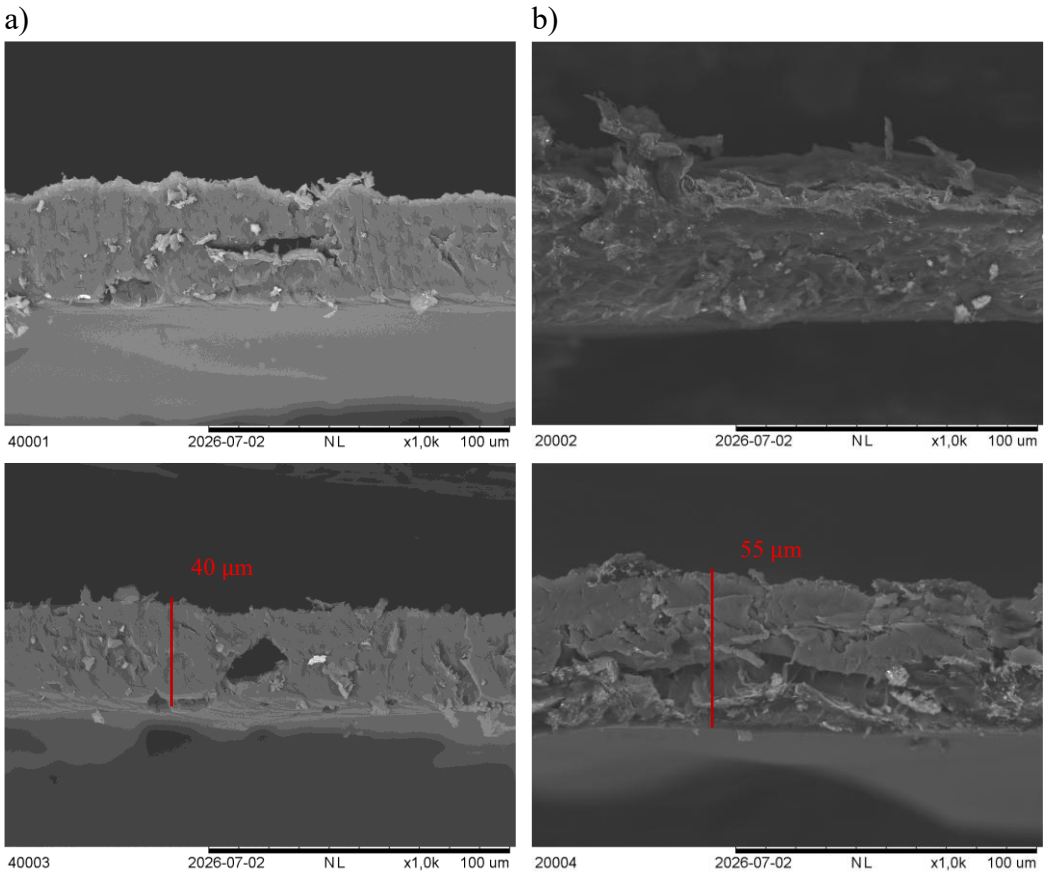


Figura 36. Imágenes SEM de la sección transversal de las membranas a) M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm) y b) M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm), en dos zonas distintas a magnificación de x1,0k.

A pesar de ser una diferencia micrométrica, esta influye en el rendimiento de las membranas, ya que en las pruebas de rendimiento M18 obtuvo flujos de permeado mucho menores que M17 y a su vez presentó un mejor rendimiento en el rechazo de sales y disminución de turbidez, por lo que el espesor es una condición de gran impacto en el diseño de las membranas.

5.4.3. Porosidad y tamaño medio de poros

La porosidad (ε) y el tamaño medio de poros (r_m) son parámetros cruciales de las membranas, porque influyen de manera considerable en la permeabilidad y el rechazo de solutos. Generalmente, una membrana con mayor porosidad y un tamaño de poros más grande presenta menor resistencia al transporte del agua, por ende, una mejor permeabilidad. Por el contrario, un menor tamaño de poros tiende a mejorar el rechazo de solutos, especialmente en procesos de micro y ultrafiltración.

En la Tabla 15 se presentan los resultados experimentales de ambos parámetros, la porosidad se calculó a partir del método gravimétrico húmedo-seco y se obtuvieron valores que oscilan entre un 5% y 24%, siendo la porosidad más alta de M4, membrana fabricada con la menor concentración de PS (15%) y una concentración media de PVP (0,75%). En cuanto al tamaño medio de poro se calcularon utilizando la ecuación de Guernot-Elford-Ferry, obteniendo tamaños que varían desde los 0 hasta los 0,41 nm, donde el mayor tamaño corresponde a M16 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm).

En el extremo opuesto, M13 (25% PS, 0% PVP, 300 µm) es la membrana que presentó los niveles más bajos en ambos parámetros, consolidándose como la estructura más cerrada y densa.

Tabla 15. Resultados de porosidad y tamaño medio de poros de membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18.

Membrana	ε, %	r_m, nm
M4 (15% PS, 0,75% PVP, 300 µm)	24 ± 5%	410 ± 43
M6 (15% PS, 1,5% PVP, 300 µm)	20 ± 4%	257 ± 22
M13 (25% PS, 0% PVP, 200 µm)	5 ± 2%	0
M16 (25% PS, 0,75% PVP, 300 µm)	11 ± 2%	414 ± 25
M17 (25% PS, 1,5% PVP, 200 µm)	17 ± 1%	253 ± 7
M18 (25% PS, 1,5% PVP, 300 µm)	16 ± 6%	244 ± 39

El efecto de la concentración de polímero se evidencia al comparar M4 y M16, ambas fabricadas con una concentración de 0,75% PVP y 300 µm, al aumentar el PS de un 15% a 25%, la porosidad disminuye de 24% a 11%. A pesar de que M16 se fabricó con agente generador de poros, la concentración de PVP no logra superponerse a las interacciones del poliestireno, resultando en una matriz más densa. Este comportamiento se reafirma al comparar M6 y M18, donde la porosidad disminuye de 20% a un 16%, a pesar de que ambas membranas fueron fabricadas con una mayor concentración de PVP (1,5%). La diferencia de porosidad entre las membranas se confirma gracias a los resultado de flujo de permeado que se obtuvieron en las pruebas de rendimiento, a partir de los gráficos presentes en la Figura 37, tanto M16 como M18 presentan menor flujo de permeado para todas las presiones. En cuanto al tamaño medio de poros no existe una diferencia tan marcada, en el caso de M4 y M16 fue de 0,41 µm para ambos casos, y para M6 y M18 se obtuvo 0,26 y 0,24 µm respectivamente.

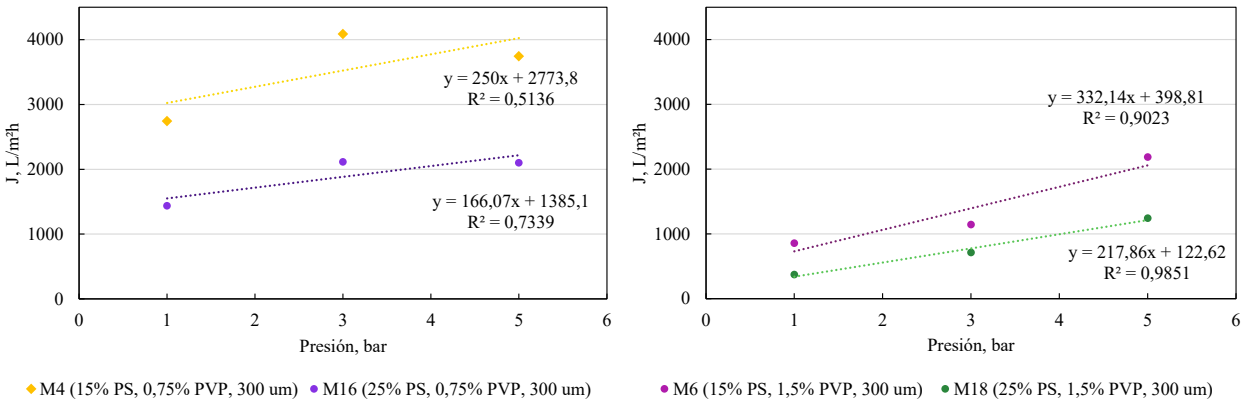


Figura 37. Gráficos de Flux vs Presión para analizar el efecto de la concentración de polímero.

Por otro lado, el rol de la PVP como agente generador de poros queda demostrado en las membranas fabricadas con 25% PS y 300 µm de espesor, la membrana M13 que fue fabricada sin generador de poros (0% PVP) presentó la porosidad más baja de un 5% y un tamaño medio de poro de 0 µm, lo cual se confirma con los resultados obtenidos en las pruebas de permeabilidad, ya que

no logró obtener permeado para ninguna de las pruebas (1, 3 y 5 bar), mientras que M17 (1,5% PVP) incrementa su porosidad a un 17% y aumenta su tamaño de poros a 0,25 µm. Esto se ve reflejado en la Figura 38, donde M17 presenta un aumento lineal en el flujo de permeado a medida que aumenta la presión, mientras que M13 se mantiene en cero.

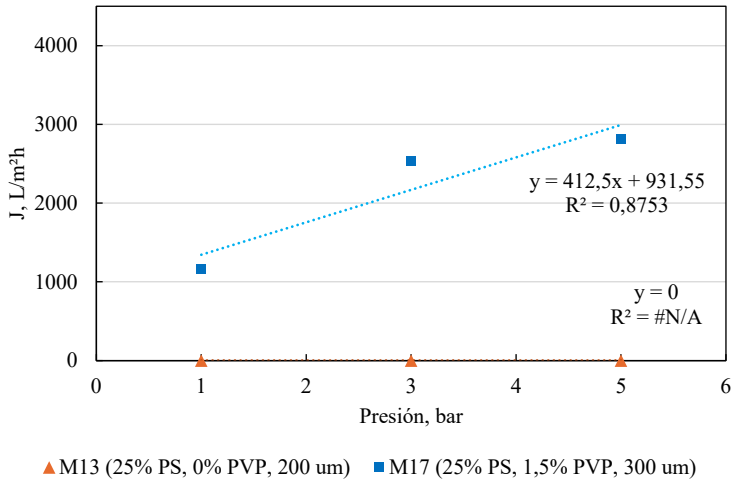


Figura 38. Gráfico de Flux vs Presión para analizar el efecto del agente generador de poros.

Por último. en lo que respecta al efecto del espesor, la diferencia que presentan las membranas M17 y M18 es mínima, ya que obtuvieron porosidades de 17% y 16% y tamaño medio de poros de 0,25 y 0,24 µm respectivamente. A pesar de ellos, si existe una clara diferencia en cuanto a sus rendimiento, en donde M17 presento valores mucho más elevados como se puede observar en la Figura 39, sin embargo, es importante considerar que el método empleado para calcular la porosidad de las membranas no entrega resultados precisos, por lo que podría no representar correctamente la porosidad real de la membrana.

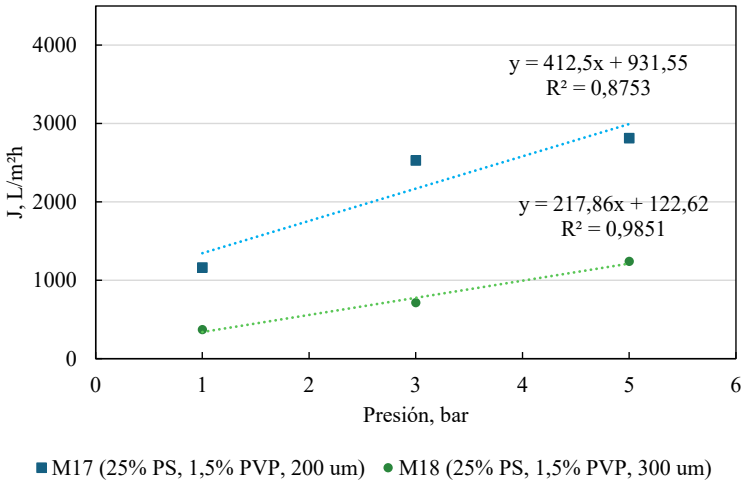


Figura 39. Gráfico de Flux vs Presión para analizar el efecto del espesor.

En la Tabla 16 se presentan los valores de porosidad y tamaño medio de poros, reportados por algunos estudios que se encuentran en la literatura similares a esta investigación, que utilizan EPS o HIPS como polímero, junto con algún tipo de aditivo como PVP, DCE, entre otros. En

comparación con los valores de porosidad, solo los resultados reportados por Sriani et al. (2024) se asemeja a los obtenidos en este estudio, mientras que en el tamaño medio de poros existe una diferencia significativa con todos los estudios.

Tabla 16. Porosidad y tamaño medio de poros reportados por estudios similares.

Polímero/Solvente	Aditivo	ε, %	r_m, nm	Referencia
HIPS/DMA	-	47-52	30-32	Garcia-Ivars et al. (2017)
EPS/NMP	PI	10-13	29-48	Sriani et al. (2024)
HIPS/NMP	DCE, CSA	64-75	3-4	Yam-Cervantes et al. (2024)
EPS/DMI	DCE, TMSCIS	73-75	0,27-0,91	Santana-Luna et al. (2025)
EPS y PPSU/NMP	DCE	74-80	5-14	Huhn-Ibarra et al. (2025)
EPS/DMF	PF127	60-80	70-95	Mansor & Radwan (2025)
EPS/NMP	TiO_2, PVP, LiCl	75-90	2-36	Sureash et al. (2026)
EPS/d-limoneno	PVP	5-24	0-410	Este estudio

Sin embargo, en proceso típicos de micro y ultrafiltración la porosidad puede variar en rangos de 70-85% y 30-80% respectivamente, por lo que el parámetro de mayor importancia corresponde al tamaño de poros, que para microfiltración se encuentran en un rango de 100-10^3 nm, mientras que para ultrafiltración entre 10-100 nm (Mulder, 1991). Por lo que las membranas de este estudio se clasifican en el rango de microfiltración, siendo capaces de remover solidos suspendidos o partículas de gran tamaño.

5.4.4. Humectabilidad

Se realizaron mediciones del ángulo de contacto a las membranas para conocer la humectabilidad de la superficie y como se modifica en base a las condiciones de diseño. La Figura 40 ilustra el ángulo de contacto de todas las muestras de membranas, de ella se observa que la mayoría presentó un ángulo bajo 90° indicando que son hidrofílicas, sin embargo, M17 presentó el mayor ángulo de 92° ± 2 superando el límite de hidrofobicidad estricta (90°).

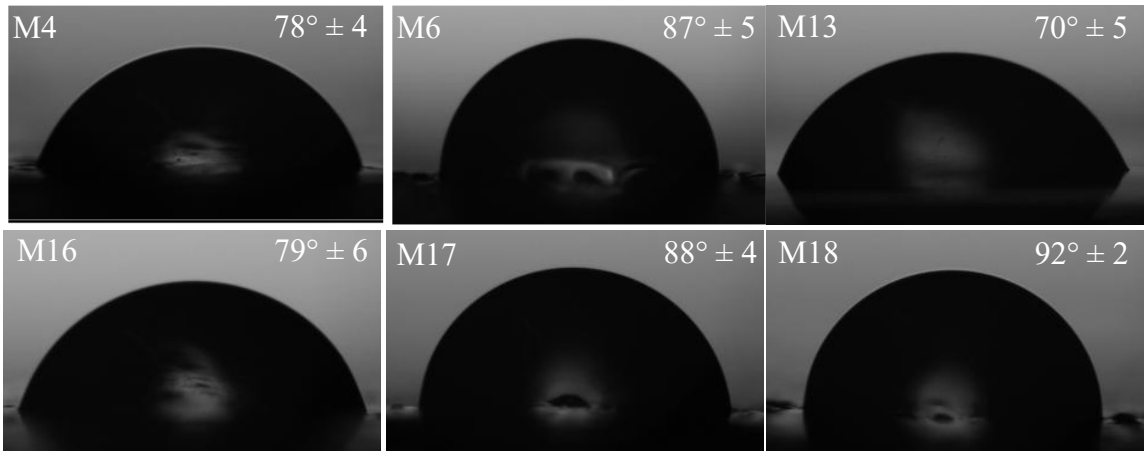


Figura 40. Ángulos de contacto de membranas M4, M6, M13, M16, M17 y M18.

En lo que respecta al efecto de las condiciones de diseño, en la Figura 41 se puede observar que a medida que la concentración de PVP aumenta (0%-1,5%), el ángulo de contacto también aumenta, pasando de 70° para la membrana sin agente generador de poros a valores cercanos a 90° para concentraciones de 1,5% PVP. En el caso de la concentración de PS el efecto es mucho menos pronunciado ya que la diferencia del ángulo entre M4 y M16 es de 1° y de 5° entre M6 y M18.

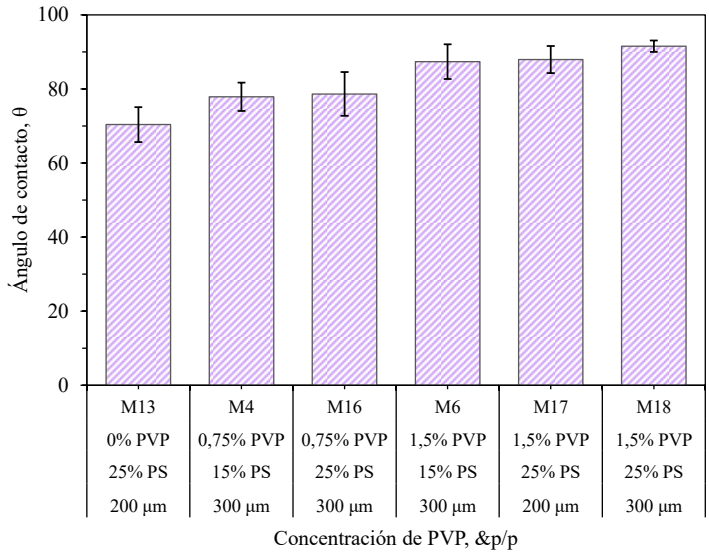


Figura 41. Ángulo de contacto de membranas de EPS con variación de concentración de PVP.

Desde un punto de vista químico, el incremento del ángulo de contacto resulta contra intuitivo debido a que el PVP es un polímero fuertemente hidrofílico, por lo que teóricamente al ser añadido a la solución debería aumentar la energía superficial y disminuir el ángulo de contacto del agua. Sin embargo, un factor importante que se debe tener en cuenta es que la PVP se añade como agente generador de poros, no como agente hidrofílico y al momento de realizar la inmersión de las membranas en el baño de coagulación se espera que abandone la matriz dando paso a una estructura porosa.

Al comparar con estudios similares que se encuentran en la literatura, se puede observar en la Figura 42 que en el 2024 Sriani et al., quienes fabricaron membranas de EPS con PVP como aditivo, reportaron que la membrana fabricada solo con EPS presento un ángulo de 69° el cual aumento hasta 84° para membranas con un 8% p/p de PVP. Por otro lado, Sureash et al. (2026) quienes igualmente fabricaron membranas de EPS y PVP como generador de poros, obtuvieron distintos resultados según el contendido de polímero, con 16% PS el ángulo disminuyó de 74° a 54° al aumentar el contenido de PVP de un 0,025% a 0,1%, en caso de 17% PS el ángulo disminuyó de 70° a 60° al aumentar el PVP de 0,025% a 0,05% pero volvió a aumentar a 68° con 0,1% de PVP, mientras que para 18% PS el ángulo de mantuvo en aproximadamente 65° a pesar del aumento de PVP. En ambos casos la superficie de las membranas resultó ser hidrofílica y el aumento del ángulo sugiere el aumento en la rugosidad de la superficie producto de los poros o macro poros formados por la incorporación del PVP, resultados los cuales se alinean con lo obtenido en este estudio.

A) B)

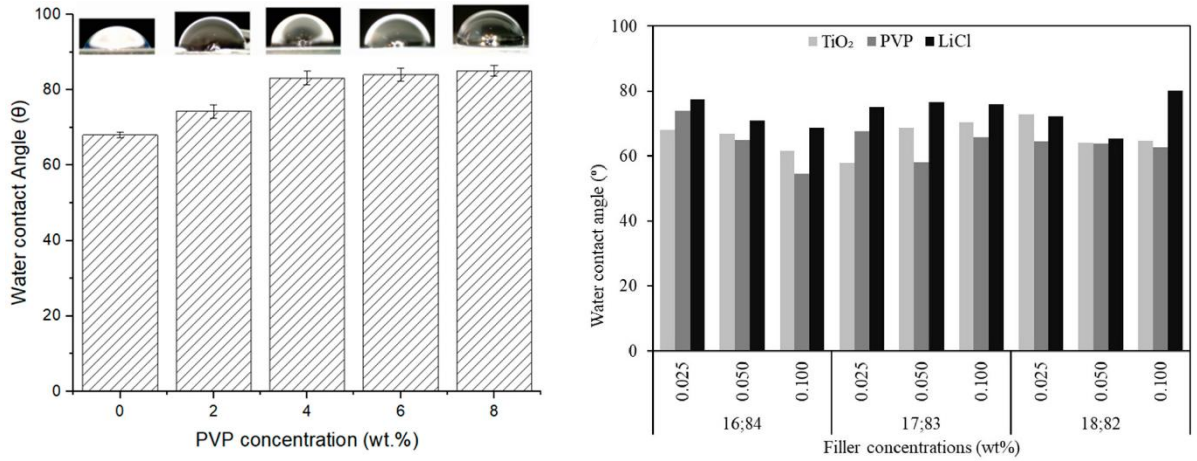


Figura 42. Ángulos de contacto reportados por A) Sriani et al. (2024) y B) Sureash et al. (2026)

6. CONCLUSIONES

Es esta investigación, se fabricaron membranas filtrantes para el tratamiento de agua a partir de poliestireno expandido reciclado y solventes verdes, mediante el método de inversión de fases por no-solvente (NIPS), bajo distintas condiciones de diseño. Las cuales fueron: tipo de solvente verde a utilizar, concentración de polímero (% p/p), concentración de agente generador de poros, espesor de la película y uso de soporte mecánico, con el fin de determinar las condiciones de diseño que maximicen el rendimiento de las membranas en términos operacionales de permeabilidad y rechazo de contaminantes.

La evaluación experimental de las condiciones de diseño para la formación de membranas mediante el método de inversión de fase inducida por no-solvente (NIPS) permitió delimitar con precisión la ventana de viabilidad técnica del sistema. Se determinó que es factible fabricar membranas funcionales y viables estructuralmente utilizando poliestireno expandido reciclado junto con d-limoneno como solvente verde, Polivinil pirrolidona como agente generador de poros y distintos espesores de películas. Por el contrario, se descartó el uso de Trioctil trimelitato (TOTM) debido a fenómenos de solidificación prematura e ineficiencia en la separación de fases, así como la incorporación de un soporte mecánico de tela no tejida (TNT) de poliéster, el cual sufrió problemas de impregnación descontrolada y deficiencia de adhesión interfacial que provocaron el desprendimiento de la matriz polimérica. Además, se puede confirmar que la concentración de polímero está directamente relacionada con la resistencia física de la membrana, ya que, a mayor concentración, mayor resistencia, y que la Polivinil pirrolida cumple su rol como agente generador de poros.

En relación con el desempeño operacional bajo distintas condiciones de trabajo, se puede concluir que las membranas presentan un rendimiento variable en términos de permeabilidad, donde las membranas sin aditivo (0% PVP) obtuvieron flujos de permeado nulos o prácticamente despreciables, los cuales se incrementan considerablemente debido a la incorporación de PVP, además de una reducción progresiva de su permeabilidad producto de una compresión en su estructura porosa debido al aumento de la presión operacional. En general, no logran eliminar sales mostrando valores de rechazo extremadamente bajos de 0% a 4,5%, lo que demuestra que no poseen poros sub-nanométricos ni carga superficial necesaria para retener especies iónicas, sin embargo, tiene la capacidad de disminuir la turbidez alcanzando hasta un 34% de remoción en algunos modelos. A partir de ello, las condiciones que maximizan el rendimiento de manera general son 15% de PS, 1,5% de PVP y 300 µm de espesor (M6), 25% de PS, 0,75% de PVP y 300 µm de espesor (M16), 25% de PS, 1,5% de PVP con 200 y 300 µm de espesor (M17 y M18).

Por último, de la caracterización fisicoquímica y morfológica de las membranas seleccionadas se puede concluir que presentan una matriz polimérica libre de trazas de d-limoneno y de PVP, con porosidades bajas entre 5-24% y tamaños medios de poro entre 0,24-0,41 µm, además de presentar ángulos de contacto entre 70° a 92° situándolas en un rango de moderada hidrofilicidad.

Finalmente, se confirma la hipótesis al lograr desarrollar y evaluar a nivel laboratorio membranas a partir de poliestireno expandido reciclado y d-limoneno como solvente verde, empleando nuevas condiciones de diseño y operación, que maximizan su operación en termino de permeabilidad y disminución de turbidez y que pueden ser utilizadas en procesos como microfiltración (MF), proyectando su escalamiento para procesos de clarificación de agua, pretratamiento de efluentes, remoción de solidos suspendido y separación de macromoléculas o microorganismos.

7. RECOMENDACIONES

A lo largo de esta investigación se estudiaron distintas variables de diseño las cuales permitieron la fabricación de membranas sustentables, viables física y operacionalmente, que obtuvieron resultados favorables en cuanto a rendimiento y caracterización, sin embargo, aún existen variables a analizar que permitan obtener iguales o mejores resultados.

En primer lugar, el uso otros solventes verdes que no se han estudiado a fondo en conjunto con el poliestireno expandido, como el α-pineno, el cual por su origen y compatibilidad según HPS podría presentar resultados similares al d-limoneno, o nuevos solventes verdes disponibles en el mercado que no se incluyeron en esta investigación.

Por otro lado, en cuanto al proceso de fabricación se recomienda utilizar un aplicador de película automático, para mantener constante la variable de velocidad con la que se estira la solución. Estudiar un baño de coagulación con una mezcla de etanol y agua, ya que se ha reportado que existen solventes o aditivos que se remueven de la matriz de mejor manera en presencia de etanol. Almacenar las membranas en húmedo (solución con preservantes) y no en seco, para evitar alteraciones en su estructura física y rendimiento operativo.

Probar el sistema con otro tipo de bomba para evaluar la disminución de turbidez, ya que la utilizada (Gamma XL, Prominent) al ser de membrana magnética, presentó problemas al operar con una solución de caolín, ya que las partículas pueden haber provocado que el imán de la bomba no cerrara al 100% perdiendo fuerza y no logrando alcanzar la presión deseada en el sistema.

Probar nuevas concentraciones de PVP menores a 1,5%, con una concentración alta de polímero (25% PS), ya que estas son las que lograron mejores resultados en cuanto a permeabilidad y disminución de turbidez, pero desfavorables en cuanto a rechazo de sales. Junto con esto, probar espesores de 100 o 50 µm manteniendo concentraciones altas de polímero que entreguen resistencia a la matriz.

Estudiar un nuevo soporte mecánico que presente menor diámetro de poros o mayor compatibilidad química con el poliestireno, o estudiar un pretratamiento para la tela no tejida de poliéster que permita la correcta adhesión del poliestireno en las microfibras y evitar la separación durante la inmersión en el baño de coagulación.

8. REFERENCIAS

Abdelrady, A., Selim, M., Barakat, N. A. M., Abdal-hay, A., & Mousa, H. M. (2026). Phase inversion strategies in membrane technology: Mechanisms, Methods, and applications. In *Journal of Polymer Research* (Vol. 33, Number 1). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/s10965-025-04702-8

ACADES. (2024). *Catastro ACADES Plantas Desaladoras de Agua de Mar en Chile*.

ACADES. (2025). *Propuesta para alcanzar la seguridad hídrica*.

Alqaheem, Y., & Alomair, A. A. (2020). Microscopy and spectroscopy techniques for characterization of polymeric membranes. *Membranes*, *10*(2). https://doi.org/10.3390/MEMBRANES10020033

Alves, D. I., Barreiros, M., Fangueiro, R., & Ferreira, D. P. (2024). Valorization of textile waste: non-woven structures and composites. *Frontiers in Environmental Science*, *Volume 12-2024*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1365162

Arrosyid, B. H., Zulfi, A., Nur'aini, S., Hartati, S., Rafryanto, A. F., Noviyanto, A., Hapidin, D. A., Feriyanto, D., & Khairurrijal, K. (2023). High-Efficiency Water Filtration by Electrospun Expanded Polystyrene Waste Nanofibers. *ACS Omega*, *8*(26), 23664–23672. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01718

Baker, R. W. . (2012). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.

Barañao Latuz, D., Guerra Pinto, P., Chacana Olivares, J., & Mery Araya, C. (2025). *Desarrollo y caracterización de membranas mejoradas a partir de poliestireno expandido y solventes verdes para el tratamiento de agua*.

Benazzouz, A., Moity, L., Pierlot, C., Sergent, M., Molinier, V., & Aubry, J. M. (2013). Selection of a greener set of solvents evenly spread in the hansen space by space-filling design. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*(47), 16585–16597. https://doi.org/10.1021/ie402410w

Biolin Scientific. (2016). *Theta Lite Manual-OneAttension Optical Tensiometer Revision 2.9 Original Instructions*.

Capricho, J. C., Prasad, K., Hameed, N., Nikzad, M., & Salim, N. (2022). Upcycling Polystyrene. In *Polymers* (Vol. 14, Number 22). MDPI. https://doi.org/10.3390/polym14225010

Carcaré, M., & Cortina, E. (2022). *Some technical and practical recommendations about pulsation dampeners in circuits with dosing or volumetric pumps description of a pulsation dampener and how it works*.

Cardoso, A. P., Giacobbo, A., Bernardes, A. M., & Ferreira, C. A. (2024). Performance evaluation of polysulfone-based membranes produced with a green solvent. *Journal of Materials Research*, *39*(10), 1525–1536. https://doi.org/10.1557/s43578-024-01327-3

Colthup, N. B., Daly, L. H., & Wiberley, S. E. (1990). AROMATIC AND HETEROAROMATIC RINGS. In *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy* (pp. 261–288). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-091740-5.50011-9

DGA. (2025). *Decretos vigentes declaración zonas de escasez hídrica*. https://dga.mop.gob.cl/derechos-de-agua/proteccion-de-las-fuentes/decretos-de-escasez-2/

Dong, X., Lu, D., Harris, T. A. L., & Escobar, I. C. (2021). Polymers and Solvents Used in Membrane Fabrication: A Review Focusing on Sustainable Membrane Development. *Membranes*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/membranes11050309

Dwi Nurherdiana, S., Wahyudi, B., Stefanny, M. J., Karlina, A., Yogaswara, R. R., Jalil, M. J., & Fansuri, H. (2023). CHARACTERISTICS OF STYROFOAM WASTE-BASED MEMBRANE THROUGH VAPOR AND LIQUID-INDUCED PHASE INVERSION PROCESS. In *Jurnal Kimia Riset* (Vol. 8, Number 1).

Ecotec. (2026). *EPS Propiedades Físicas Contenido*.

Ezugbe, E. O., & Rathilal, S. (2020). Membrane technologies in wastewater treatment: A review. In *Membranes* (Vol. 10, Number 5). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/membranes10050089

Fane, A. G., Wang, R., & Jia, Y. (2011). Membrane Technology: Past, Present and Future. In J. P. and H. Y.-T. and S. N. K. Wang Lawrence K. and Chen (Ed.), *Membrane and Desalination Technologies* (pp. 1–45). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6_1

Garcia-Ivars, J., Wang-Xu, X., & Iborra-Clar, M. I. (2017). Application of post-consumer recycled high-impact polystyrene in the preparation of phase-inversion membranes for low-pressure membrane processes. *Separation and Purification Technology*, *175*, 340–351. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.061

Hansen, C. M. (2007). *Hansen solubility parameters: a user's handbook*. CRC press.

Hebbar, R. S., Isloor, A. M., & Ismail, A. F. (2017). Contact Angle Measurements. In *Membrane Characterization* (pp. 219–255). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00012-7

Huhn-Ibarra, M., Itza-Uitzil, L. M., Yam-Cervantes, M., González-Díaz, A., Zapata-Catzin, F. J., Cauich-Cupul, J. I., Aguilar-Vega, M., & González-Díaz, M. O. (2025). Recycled Polystyrene as a Sustainable Material for Hollow Fiber Membranes in Dye Filtration. *Membranes*, *15*(10). https://doi.org/10.3390/membranes15100285

Hung, T. S., Bilad, M. R., Shamsuddin, N., Suhaimi, H., Ismail, N. M., Jaafar, J., & Ismail, A. F. (2022). Confounding Effect of Wetting, Compaction, and Fouling in an Ultra-Low-Pressure Membrane Filtration: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Number 10). MDPI. https://doi.org/10.3390/polym14102073

Kariduraganavar, M. Y., Kittur, A. A., & Kamble, R. R. (2014). Chapter 1 - Polymer Synthesis and Processing. In S. G. Kumbar, C. T. Laurencin, & M. Deng (Eds.), *Natural and Synthetic*

Biomedical Polymers (pp. 1–31). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396983-5.00001-6

Khanzada, N. K., Al-Juboori, R. A., Khatri, M., Ahmed, F. E., Ibrahim, Y., & Hilal, N. (2024). Sustainability in Membrane Technology: Membrane Recycling and Fabrication Using Recycled Waste. In *Membranes* (Vol. 14, Number 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/membranes14020052

Kilklos. (2025). *Estadísticas del Reciclaje 2024 Preliminar Envases y Embalajes*.

Korkut, S., Esenli, B., Yuksekdag, A., & Koyuncu, I. (2026). Role of non-woven support properties and support fabrication parameters in thin-film composite polyamide reverse osmosis membranes. *Separation and Purification Technology*, *404*, 138843. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.138843

Lima, F. de A., Honorato, A. C. S., Medeiros, G. B., Chagas, P. A. M., da Silva, E. N., Vieira, A. C. C., Oliveira, W. P., Aguiar, M. L., & Guerra, V. G. (2025). Analysis of recycled polystyrene electrospinning process: Fiber diameter, morphology, and filtration applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(2). https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115435

Lin, H., Li, Z., Sun, Y., Zhang, Y., Wang, S., Zhang, Q., Cai, T., Xiang, W., Zeng, C., & Tang, J. (2024). D-Limonene: Promising and Sustainable Natural Bioactive Compound. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 14, Number 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/app14114605

Liu, G., Pan, J., Xu, X., Wang, Z., & Cui, Z. (2020). Preparation of ECTFE porous membrane with a green diluent TOTM and performance in VMD process. *Journal of Membrane Science*, *612*. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118375

Loh, C. Y., Burrows, A. D., & Xie, M. (2025). Sustainable Polymeric Membranes: Green Chemistry and Circular Economy Approaches. In *ACS ES and T Engineering* (Vol. 5, Number 8, pp. 1882–1906). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/acsestengg.5c00282

Luo, J., Wu, C., Xu, T., & Wu, Y. (2011). Diffusion dialysis-concept, principle and applications. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 366, Numbers 1–2, pp. 1–16). https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.10.028

Mansor, E. S., Abdallah, H., & Shaban, A. M. (2024). Highly effective ultrafiltration membranes based on plastic waste for dye removal from water. *Water Environment Research*, *96*(5). https://doi.org/10.1002/wer.11018

Mansor, E. S., & Radwan, E. K. (2025). Recycling of puffed polystyrene beads waste as a low-cost antifouling ultrafiltration membrane for water purification. *Polymer Engineering and Science*, *65*(1), 191–201. https://doi.org/10.1002/pen.27001

McGraw-Hill. (2012). *Water Treatment Plant Design* (T. A. W. W. A. (AWWA) & T. A. S. of C. E. (ASCE), Eds.; 5th Edition). McGraw-Hill Education. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071745727

Meriggi. (2026). *Tnt 80gr/m2 color "blanco" 1.60 ancho*.

Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *Hoja de ruta para un Chile circular al 2024*.

Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. In *Membrane Characterization* (pp. 3–29). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2

Mulder, M. (1991). *Basic Principles of Membrane Technology*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0835-7

Naciones Unidas. (2024). *Agua para la prosperidad y la paz Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024* (UNESCO, Ed.). www.unesco.org/es/open-

Naeem, A., Saeed, B., AlMohamadi, H., Lee, M., Gilani, M. A., Nawaz, R., Khan, A. L., & Yasin, M. (2024). Sustainable and green membranes for chemical separations: A review. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 336). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126271

Nakanishi, K. (1962). *Infrared Absorption Spectroscopy, Practical*. Holden-Day. https://books.google.com.ec/books?id=cMKwAAAAIAAJ

Naziri, S. A., Vatanpour, V., & Koyuncu, I. (2022). Green solvents in polymeric membrane fabrication: A review. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 298). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121691

ONU-Agua. (2024). *Resumen informativo Situación a mitad de período de los indicadores mundiales del ODS 6 y las necesidades de aceleración*.

Pacto Chileno de los Plásticos. (2024). *Reportabilidad Pacto Chileno de los Plásticos Data 2024*.

Pinnau, I., & Freeman, B. D. (2000). *Formation and Modification of Polymeric Membranes: Overview*. https://pubs.acs.org/sharingguidelines

Ramírez-Martínez, M., Aristizábal, S. L., Szekely, G., & Nunes, S. P. (2022). Bio-based solvents for polyolefin dissolution and membrane fabrication: from plastic waste to value-added materials. *Green Chemistry*, *25*(3), 966–977. https://doi.org/10.1039/d2gc03181g

Ren, J., & Wang, R. (2011). Preparation of Polymeric Membranes. In L. K. Wang, J. P. Chen, Y.-T. Hung, & N. K. Shammas (Eds.), *Membrane and Desalination Technologies* (pp. 47–100). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6_2

Russo, F., Marino, T., Galiano, F., Gzara, L., Gordano, A., Organji, H., Figoli, A., & Husson, S. M. (2021). *Tamisolve ® NxG as an Alternative Non-Toxic Solvent for the Preparation of Porous Poly (Vinylidene Fluoride) Membranes*. https://doi.org/10.3390/polym

Sahu, L. R., Yadav, D., Borah, D., Gogoi, A., Goswami, S., Hazarika, G., Karki, S., Borpatra Gohain, M., Sawake, S. V., Jadhav, S. V., Chatterjee, S., & Ingole, P. G. (2024). Polymeric Membranes for Liquid Separation: Innovations in Materials, Fabrication, and Industrial Applications. In *Polymers* (Vol. 16, Number 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/polym16233240

Santana-Luna, S., Yam-Cervantes, M., Sulub-Sulub, R., Huhn-Ibarra, M., Vázquez, H., Duarte, S., Herrera-Kao, W., & González-Díaz, M. O. (2025). Sustainable Membranes for Water Treatment from Expanded Polystyrene Waste Using Dimethyl Isosorbide as a Green Solvent. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *13*(42), 17939–17948. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c06312

Shammas, N. K., & Wang, L. K. (2011). Membrane Systems Planning and Design. In L. K. Wang, J. P. Chen, Y.-T. Hung, & N. K. Shammas (Eds.), *Membrane and Desalination Technologies* (pp. 333–389). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6_8

Sing Soh, L., Uyin Hong, S., Zeng Liang, C., & Fen Yong, W. (2023). Green solvent-synthesized polyimide membranes for gas separation: Coupling Hansen solubility parameters and synthesis optimization. *Chemical Engineering Journal*, *478*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147451

Sovtić, N., Predrag, K. S., Bera, O. J., Pavličević, J. M., Govedarica, O. M., Jovičić, M. C., & Govedarica, D. D. (2020). A review of environmentally friendly rubber production using different vegetable oils. In *Polymer Engineering and Science* (Vol. 60, Number 6, pp. 1097–1117). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/pen.25443

Sriani, T., Mahardika, M., Aldhama, S. A., Wulandari, C. P., & Prihandana, G. S. (2024). Upcycling of Expanded Polystyrene Waste-Impregnated PVP Using Wet-Phase Inversion for Effective Microalgae Harvesting. *Polymers*, *16*(19). https://doi.org/10.3390/polym16192703

Sriani, T., Mahardika, M., Miki, N., Wulandari, C. P., & Prihandana, G. S. (2024). Impact of polyimide on the recycling of waste expanded polystyrene into flat-sheet filtration membrane. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *26*(6), 3745–3756. https://doi.org/10.1007/s10163-024-02073-8

Sriani, T., Wannomai, T., Thepsonthi, T., Wulandari, C. P., Rahmania, R. A., Mahardika, M., Miki, N., & Prihandana, G. S. (2026). Valorization of Thermoplastic Polyurethane and Styrofoam Waste for Development of Improved Sustainable Blend Membranes. *Sustainable Chemistry*, *7*(2). https://doi.org/10.3390/suschem7020027

Sureash, V. ALI., Chang, Z. H., & Teow, Y. H. (2026). Sustainable plastic waste reutilization into polymeric membranes: Feasibility, performance, and fouling analysis. *Total Environment Engineering*, *7*, 100084. https://doi.org/10.1016/j.teengi.2026.100084

Swefi, Y. M., Isawi, H., Ali, M. E. A., Farag, A. B., Khalil, E. M., & El-Aassar, A. hameed M. (2025). A comparative investigation on the performances of different nanocomposite ultrafiltration membranes for wastewater reuse. *Surfaces and Interfaces*, *64*. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106361

Teow, Y. H., Ting Wei Huan, A., & Chang, Z. H. (2025). Optimization of waste plastic reutilized polymeric membrane fabrication for efficient wastewater treatment. *Next Sustainability*, *6*. https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100117

Wang, P., & Chung, T. S. (2015). Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 474, pp. 39–56). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.09.016

Wang, X., Zhang, X., Zhao, S., Xiao, Y., Wen, X., Tong, Y., & Zhao, Y. (2024). Design and preparation of woven fabric-reinforced substrate: A new pathway for robust thin film composite membrane. *Polymer Testing*, *137*. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108490

Xie, W., Li, T., Tiraferri, A., Drioli, E., Figoli, A., Crittenden, J. C., & Liu, B. (2021). Toward the Next Generation of Sustainable Membranes from Green Chemistry Principles. In *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (Vol. 9, Number 1, pp. 50–75). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07119

Yam-Cervantes, M. A., Sulub-Sulub, R., Hunh-Ibarra, M., Duarte, S., Uc-Fernandez, E., Pérez-Canales, D., Aguilar-Vega, M., & González-Díaz, M. O. (2024). Asymmetric Membranes Obtained from Sulfonated HIPS Waste with Potential Application in Wastewater Treatment. *Membranes*, *14*(12). https://doi.org/10.3390/membranes14120247

Zhang, S., Shen, L., Deng, H., Liu, Q., You, X., Yuan, J., Jiang, Z., & Zhang, S. (2022). Ultrathin Membranes for Separations: A New Era Driven by Advanced Nanotechnology. *Advanced Materials*, *34*(21), 2108457. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202108457

Zou, D., Nunes, S. P., Vankelecom, I. F. J., Figoli, A., & Lee, Y. M. (2021). Recent advances in polymer membranes employing non-toxic solvents and materials. In *Green Chemistry* (Vol. 23, Number 24, pp. 9815–9843). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d1gc03318b

Zulfi, A., Munir, M. M., Hapidin, D. A., Rajak, A., Edikresnha, D., Iskandar, F., & Khairurrijal, K. (2018). Air filtration media from electrospun waste high-impact polystyrene fiber membrane. *Materials Research Express*, *5*(3). https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab6ef

9. ANEXOS

Anexo A

En el siguiente anexo en la Tabla 17, se presentan los parámetros de solubilidad de Hansen del poliestireno y diferentes solventes verdes reportados en la literatura, como posibles alternativas para fabricación de membranas sustentables.

Tabla 17. Parámetros de solubilidad de Hansen.

Compuesto	δ_d $MPa^{1/2}$	δ_p $MPa^{1/2}$	δ_h $MPa^{1/2}$	R_0	Referencia
Poliestireno	21,3	5,8	4,3	12,7	Hansen (2007)
2-pirrolidona	19,4	17,4	11,3		Hansen (2007)
Aceite de ricino	15,9	4,6	12,0		Hansen (2007)
Aceite de soya	15,4	1,5	4,6		Sovtić et al. (2020)
Acetato de butilo	15,8	3,7	6,3		Hansen (2007)
Agnique AMD 3L	18,4	12,9	15,9		Naziri et al. (2022)
A-pineno	16,9	1,8	3,1		Ramírez-Martínez et al. (2022)
Carbonato de butileno	16,9	18,9	9,1		Hansen (2007)
Carbonato de etileno	19,4	21,7	5,1		Hansen (2007)
Carbonato de propileno	20,0	18,0	4,1		Hansen (2007)
Cyrene	18,8	10,6	6,9		Naziri et al. (2022)
Dimetil isosorbida (DMI)	17,6	7,1	7,5		Russo et al. (2021)
Dimetil lactamida (DML)	18,4	12,9	15,9		Naziri et al. (2022)
Dimetil silfoxido (DMSO)	18,4	16,4	10,2		Hansen (2007)
D-limoneno	17,2	1,8	4,3		Ramírez-Martínez et al. (2022)
Fosfato de trietilo (TEP)	16,8	11,5	9,2		Hansen (2007)
γ-Valerolactona (GVL)	19,0	16,6	7,4		Naziri et al. (2022)
Lactato de etilo	16,0	7,6	12,5		Hansen (2007)
Lactato de metilo	15,8	6,5	10,2		Xie et al. (2021)
P-cimeno	18,5	2,6	1,9		Benazzouz et al. (2013)
PolarClean	15,8	10,7	9,2		Naziri et al. (2022)
Tomisolve NxG	17,8	8,2	5,9		Naziri et al. (2022)
Trioctil trimelitato (TOTM)	16,6	2,61	6,03		Liu et al. (2020)