



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA CONTAMINADA  
PARA LA ELIMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES,  
MICROPLÁSTICOS Y PARACETAMOL EMPLEANDO FILTRACIÓN,  
MICROFILTRACIÓN Y SISTEMA DE ADSORCIÓN”**

**TESIS INDIVIDUAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

**PRESENTA**

**ANDREA GODÍNEZ SANSORES**

**DIRIGIDA POR**

**Dr. JORGE NOEL GRACIDA RODRÍGUEZ**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2024**

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



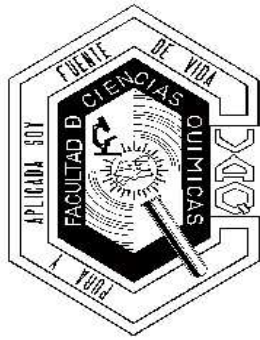
**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

“DISEÑO DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA  
CONTAMINADA PARA LA ELIMINACIÓN DE COLIFORMES  
FECALES, MICROPLÁSTICOS Y PARACETAMOL EMPLEANDO  
FILTRACIÓN, MICROFILTRACIÓN Y SISTEMA DE ADSORCIÓN”

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

PRESENTA

ANDREA GODÍNEZ SANSORES

DIRIGIDA POR

Dr. JORGE NOEL GRACIDA RODRÍGUEZ

DIRECTOR

DR. JORGE NOEL GRACIDA RODRÍGUEZ

SINODAL

DRA. MONSERRAT ESCAMILLA GARCÍA

SINODAL

DR. CARLOS REGALADO GONZÁLEZ

SINODAL

DRA. EVELYN ZAMUDIO PÉREZ

## AGRADECIMIENTOS

Durante estos años de carrera he tenido la grandiosa oportunidad de aprender mucho de la ciencia, de la vida y de mi misma, siempre conté con el apoyo y guía de muchas personas que me rodearon, por lo que aquí expresé mi más profundo agradecimiento.

Primero y ante todo, quiero agradecer a mis padres, Francisco Godinez y Norma Sansores por su amor, motivación y por siempre apoyarme en mis proyectos. Su confianza en mí ha sido una fuente de motivación y fortaleza durante todo este proceso.

A mi director de tesis, Dr. Jorge Gracida, gracias por creer en mí y mis habilidades, gracias por sus valiosos consejos, paciencia, enseñanza, recursos físicos y espacio para que pudiera realizar mi tesis. Su dedicación y compromiso con mi trabajo han sido fundamentales para la realización de esta tesis.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo moral, tiempo para escucharme o ayudarme y por compartir conmigo tanto tiempo de estudio pero también tiempo de diversión. Sus presencias han hecho de este viaje algo mucho más llevadero y enriquecedor.

Finalmente, a los profesores y mis sinodales, por guiarme con sus enseñanzas que han sido cruciales para mi desarrollo profesional y personal. Su compromiso con la educación de calidad ha sido una inspiración constante. Aunque sus nombres no aparezcan aquí, mi más sincero agradecimiento. Su influencia y ayuda han sido invaluable para alcanzar este logro.

Gracias a todos por ser parte de este importante capítulo de mi vida.

Atentamente,

Andrea Godínez Sansores

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
1.1 Contaminación	1
1.1.1 Coliformes	2
1.1.2 Microplásticos	2
1.1.3 Fármacos	3
1.2 Tratamientos de agua	3
1.2.1 Filtración	4
1.2.2 Microfiltración y ultrafiltración	4
1.2.3 Adsorbentes	5
1.3 Membranas	5
1.3.1 Geometría de las membranas	5
1.3.2 Membrana en espiral	5
1.3.3 Tipos de membranas	7
<b>2. HIPÓTESIS</b>	<b>10</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
3.1 General	11
3.2 Específicos	11
<b>4. MATERIALES Y METODOLOGÍA</b>	<b>12</b>
4.1 Materiales	12
4.2 Métodos	13
4.2.1 Membrana de filtración	13
4.2.1.1 Ensamblaje de la membrana en configuración de espiral	13
4.2.2 Membrana de microfiltración en espiral	13
4.2.2.1 Purificación y funcionalización de MWNTs	13
4.2.2.2 Síntesis de 3-glicidil-5, 5-dimetilhidantoína	13
4.2.2.3 Preparación de N-Si-MWNT	14
4.2.2.4 Preparación de membranas híbridas de PVDF	14
4.2.2.5 Ensamblaje de la membrana en configuración de espiral	14
4.2.3 Módulo de adsorción	14
4.2.3.1 Preparación del carbón activado	14
4.2.3.2 Ensamble del módulo de carbón activado	15
4.2.4 Agua contaminada artificialmente	15
4.2.4.1 E. coli	15
4.2.4.2 Microplásticos	15

4.2.4.3 Paracetamol	16
4.2.4.4 Concentración de contaminantes	16
4.2.5 Configuraciones a probar en el ensamblaje del tren	16
4.2.5.1 Filtración-Microfiltración-Adsorción	16
4.2.5.2 Adsorción-Filtración-Microfiltración	16
4.2.5.3 Filtración-Adsorción-Microfiltración	16
4.2.6 Cuantificación de contaminantes.	17
4.2.6.1 Cuantificación de coliformes fecales.	17
4.2.6.2 Cuantificación de paracetamol.	17
4.2.6.3 Cuantificación de microplásticos.	17
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>18</b>
5.2.1 Membrana de filtración	18
5.2.2 Membrana de microfiltración en espiral	18
5.2.2.1 Preparación de membranas híbridas de PVDF	18
5.2.2.2 Ensamblaje de la membrana en configuración de espiral	19
5.2.3 Módulo de adsorción	19
5.2.3.1 Ensamble del módulo de carbón activado	19
5.2.4 Agua contaminada artificialmente	20
5.2.5 Configuraciones a probar en el ensamblaje del tren	20
5.2.5.1 Filtración-Microfiltración-Adsorción	20
5.2.5.2 Adsorción-Filtración-Microfiltración	24
5.2.5.3 Filtración-Adsorción-Microfiltración	27
<b>6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>30</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>33</b>
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>34</b>
<b>9. ANEXO</b>	<b>43</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Tipos de membranas	7
2. Resultados de concentración de paracetamol configuración F-MF-A	22
3. Peso microplásticos configuración F-MF-A	22
4. Resultados de concentración de paracetamol configuración A-F-MF	25
5. Peso microplásticos configuración A-F-MF	25
6. Resultados de concentración de paracetamol configuración F-A-MF	28
7. Peso microplásticos configuración A-F-MF	28
8. Comparación de resultados del agua tratada contra la concentración inicial de contaminantes	30
9. Comparación de todos los resultados	31
10. Comparación de resultados del tratamiento de agua realizado y de otros estudios, es su porcentaje de disminución.	32
11. Duración del tratamiento de agua de las distintas configuraciones	43
12. Comparación de las muestras de las membranas de las diferentes configuraciones	43
13. Comparación de las concentraciones expresadas en UFC/ L finales de coliformes fecales del tratamiento de agua de las distintas configuraciones.	44
14. Comparación de todos los resultados.	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diseño de la membrana en espiral.	6
2. Módulo de filtración y su enrollamiento.	18
3. Pasos de la preparación de membrana híbrida de PVF.	18
4. Módulo de microfiltración.	19
5. Módulo de adsorción.	19
6. Agua contaminada.	20
7. Tren de tratamiento F-MF-A.	20
8. Microbiología de configuración F-MF-A.	21
9. Comparación de concentración inicial de coliformes fecales contra concentración final para la configuración 1.	21
10. Comparación de concentración inicial de paracetamol contra concentración final para la configuración 1.	22
11. Comparación de concentración inicial de microplásticos contra concentración final para la configuración 1.	23
12. Tren de tratamiento A-F-MF.	23
13. Microbiología de configuración A-F-MF.	24
14. Comparación de concentración inicial de coliformes fecales contra concentración final para la configuración 2.	24
15. Comparación de concentración inicial de paracetamol contra concentración final para la configuración 2.	25
16. Comparación de concentración inicial de microplásticos contra concentración final para la configuración 2.	26



17. Tren de tratamiento F-A-MF.	26
18. Microbiología de configuración F-A-MF.	27
19. Comparación de concentración inicial de coliformes fecales contra concentración final para la configuración 3.	27
20. Comparación de concentración inicial de paracetamol contra concentración final para la configuración 3.	28
21. Comparación de concentración inicial de microplásticos contra concentración final para la configuración 3.	29
22. Gráficas de resultados del tratamiento de agua con las distintas configuraciones.	30

## RESUMEN

Uno de los recursos más importantes para el ser humano y para todos los ecosistemas es el agua, la cual puede ser contaminada fácilmente por actividades humanas. Los contaminantes más comunes son los microbianos, se evalúan contando los coliformes fecales que afectan la salud humana. Una creciente preocupación se ha dirigido a la contaminación por fármacos activos que se excretan sin metabolizar y terminan en el agua, de igual manera el incremento de uso de plásticos que generan microplásticos y llegan a contaminar el agua. La forma más sustentable para obtener agua pura es su reutilización, por lo que se busca su tratamiento por distintas formas, generalmente haciendo filtraciones. El objetivo de este proyecto es presentar una propuesta para purificar el agua mediante un tren de tratamiento que se basa en 3 etapas (filtración, microfiltración y adsorción) para quitar contaminantes de coliformes fecales, microplásticos y paracetamol, se pusieron a prueba distintas configuraciones para obtener una calidad máxima, al finalizar se evaluó el agua tratada con los métodos correspondientes para analizar la concentración de los distintos contaminantes. Los resultados obtenidos muestran que las tres configuraciones evaluadas lograron reducir la concentración de contaminantes en el agua contaminada artificialmente. La configuración Filtración-Microfiltración- Adsorción (F-MF-A) destacó como la más efectiva en la eliminación de coliformes fecales, microplásticos y paracetamol. Esta configuración demostró una reducción significativa en la concentración de los contaminantes, con una concentración final de coliformes fecales de  $77 \times 10^4$  UFC/L, 0.067 mg/L de paracetamol, y 0.013 g de microplásticos. Además, logró un tiempo de tratamiento de 2 min y 32 s. Aunque los resultados indican que la configuración F-MF-A es la más efectiva en la eliminación de múltiples contaminantes y ofrece un equilibrio entre eficacia y tiempo de tratamiento, se observa que cada configuración tiene sus propias ventajas y limitaciones, lo que destaca la importancia de considerar diferentes factores al diseñar un sistema de tratamiento de agua para maximizar su eficiencia y efectividad.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Contaminación

El agua dulce es un recurso invaluable y escaso, el cual puede ser fácilmente contaminado. Mejorar la calidad del agua puede ser difícil y caro de restablecer. La mayoría de las fuentes contaminantes del agua son: construcciones, municipios, agricultura, extracción y producción de materiales, y la industria en general (Walker y col., 2019). Esto lleva a altos niveles de compuestos químicos, algunos de ellos tóxicos, contaminando el agua y causando daños tanto a la salud humana como al ambiente. El agua es crucial para el mantenimiento del ciclo de vida, por lo que debe ser cuidada y limpiada de los contaminantes (Dharwal y col., 2020).

Más del 60% de los sistemas fluviales en México muestran signos de contaminación, de las 2764 locaciones de agua superficial monitoreadas por la Comisión Nacional de Aguas en México, en todo el país durante 2019, 72% de estos sitios tuvo valores de coliformes fecales (CF) mayores a 100 número más probable (NMP)/100 mL y más del 50% mostró valores de CF por encima de 1000 NMP/100 mL, que son más altos que los establecidos por las autoridades; según la NOM-127-SSA1-1994 el límite permisible de CF son 2 NMP/100 mL para uso humano y según la NOM-003-ECOL-1997 el límite permisible de CF para descargas de agua tratada en cuerpos receptores de agua marina y agua salobre es de 2000 NMP/100 mL y de 1000 NMP/100 mL para cuerpos receptores de agua dulce. Para mejorar la calidad y condiciones del agua de sitios urbanizados, es vital desarrollar e integrar estrategias para su restauración y rehabilitación de estos sistemas (Mora y col., 2021).

La calidad del agua se puede analizar usando los siguientes tres parámetros; físicos, químicos y biológicos. Cambios en las características físicas de los cuerpos de agua son visibles por los rasgos de turbidez, color, temperatura, sabor y olor. Una turbiedad alta en el agua puede causar la disminución de pH y de la cantidad de oxígeno disuelto en la misma, también resulta en agua ácida que puede dañar las distintas formas de vida presentes. Parámetros químicos, como sólidos disueltos, compuestos orgánicos y metales causan deficiencia en la calidad del agua disminuyendo su cantidad de oxígeno y aumentando el nitrógeno en los cuerpos de

agua. Aspectos biológicos del agua como la presencia de patógenos (virus, bacterias, parásitos, gusanos y protozoos) pueden poner en riesgo la salud del ecosistema y de los humanos (Hairon y col., 2021).

#### 1.1.1 Coliformes

Los altos niveles de contaminación microbiana, son los más comunes que afectan la calidad del agua recreativa, e incluso las fuentes de agua potable. Ésta, se evalúa contabilizando de forma rutinaria bacterias indicadoras fecales, tales como: enterococos y coliformes, la más conocida, *Escherichia coli* (Zhang y col., 2021). Los coliformes se definen como bacterias anaerobias facultativas, gram negativas, en forma de bastoncillos, que no esporulan, se desarrollan en 24 h y son termotolerantes (Divya y col., 2016). Las bacterias que pertenecen a la familia Bacteroidetes son específicas para el intestino y las heces de los mamíferos, los bacteroides pueden representar más del 36% de la microbiota intestinal en términos de la población (Pendergraph y col., 2021). *E. coli* generalmente se considera una biota entérica normal, sin embargo, algunas cepas tienen riesgos potenciales para la salud, por ejemplo, *E. coli* O157: H7. Enfermedades, incluidas la cistitis aguda y la diarrea sanguinolenta, han confirmado una correlación existente con dicha bacteria y generalmente se asocia con la presencia de otros patógenos (Xu y col., 2021).

#### 1.1.2 Microplásticos

Un tercio de los residuos plásticos acaban en suelos o agua dulce, el cual se desintegra en partículas menores a 5 milímetros, generando microplásticos (MP), éstos se pueden desintegrar hasta formar nanopartículas de 0.1 micrómetros de tamaño las cuales entran a la cadena alimenticia y al cuerpo humano. Se pueden encontrar en el grifo del agua según un estudio de Orb Media, en el 2018 analizó muestras de agua de distintos países y de las muestras obtenidas 83% contenían microplásticos (Fundación Aquae, 2018). En 2022 la producción anual de plástico fue de más de 390 millones de toneladas métricas, de la cual la mitad se convierte en residuos después de unos años de uso. Solo 9% se recicla, 12-19% se incinera y un 72% termina en vertederos o en el medio ambiente, distintos factores como el agua, el viento, sol y microorganismos degradan el plástico formando las partículas de microplásticos (Iberdrola, 2022). Todavía no se llega a un acuerdo del daño provocado por los microplásticos, pero lo que se sabe es que están hechos de

compuestos químicos y aditivos que podrían ser tóxicos lo que genera preocupación de investigadores (Parker, 2022).

### 1.1.3 Fármacos

La producción de fármacos ha aumentado rápidamente en las últimas décadas, proporcionando una mejor calidad de salud para humanos y animales (Benyekkou y col., 2020). Miles de toneladas de sustancias farmacológicamente activas se utilizan anualmente para tratar enfermedades. Algunas de estas sustancias se excretan sin metabolizar o son desechadas como metabolitos activos; llegan a evitar la degradación en las plantas de tratamiento de residuos y entran al medio ambiente (Zuccato y col., 2000). Los fármacos son generalmente: antibióticos, hormonas, analgésicos, antiinflamatorios, reguladores de lípidos en sangre, bloqueadores beta y medicamentos citostáticos por mencionar los más empleados. Las concentraciones de algunas sustancias adicionales, como los excipientes, pueden permanecer casi sin cambios (Yang y col., 2017). El paracetamol (PA) es uno de los analgésicos más empleados, su consumo alcanza a ser de miles de toneladas por año en todo el mundo. Este fármaco tiene una alta tasa de eliminación en plantas de tratamiento de aguas residuales (> 90%), pero se ha detectado en efluentes de aguas residuales a niveles de hasta 200 µg/L (Koagouw y col., 2021). No existe una norma mexicana que establezca la ocurrencia de fármacos en cuerpos de agua (Castro y col., 2021). En la potabilización de agua, se ha encontrado este fármaco. Sus residuos podrían causar daños e insuficiencia hepática en humanos al consumirse (Ayuso, 2015), el paracetamol o N-(4-hidroxifenil acetamida), es un metabolito fenacetin con características analgésicas y efectos antipiréticos (Pollap y col., 2020).

### 1.2 Tratamientos de agua

La alternativa más efectiva sustentable para la obtención de agua limpia es su reutilización, ésta puede venir de aguas residuales, grises y de lluvia. El tratamiento para reciclar agua es una combinación de operaciones unitarias que se pueden dividir en primarias, secundarias y tratamientos avanzados (Deng y col., 2019). Los primarios se basan en separar materiales contaminantes grandes e insolubles en el agua por medio de la filtración (F). El tratamiento secundario es fundamentalmente

un método biológico, que está destinado a eliminar los contaminantes orgánicos que requieren oxígeno. Las tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales más comunes son: membranas, filtración, procesos avanzados de oxidación, humedales, aplicación de microalgas, luz UV, adsorción, intercambio iónico, etc. (Fito y col., 2021).

### 1.2.1 Filtración

La mayoría de las plantas tratadoras de agua, sólo usan tratamientos convencionales como filtración. Estos procesos no tienen la capacidad de tratar contaminantes orgánicos, nitrogenados y con metales pesados en concentraciones altas de manera eficiente (Abu y col., 2020). La filtración por membrana tiene muchos beneficios: es simple y rápida de llevar a cabo, se adapta a cualquier volumen, no es costosa y se pueden usar diferentes tipos de materiales, el tamaño y estructura de medio a filtrar es factor para seleccionar la membrana que se requiere (El y col., 2021), las desventajas de este método son: ensuciamiento en un corto periodo de tiempo (polarización), el diseño y la operación juegan un papel importante en el desempeño y durabilidad de la filtración (Matusiak y col., 2021).

### 1.2.2 Microfiltración y ultrafiltración

Las membranas de microfiltración (MF) usualmente tienen poros de entre 0.1-10  $\mu\text{m}$ , y las de ultrafiltración (UF) usualmente separan macromoléculas y coloides de soluciones (Lafi y col., 2018). La eficiencia para remover bacterias en la MF se basa en el tamaño de poro de la membrana, uno mínimo de 1.4  $\mu\text{m}$  es usado para lograr un balance entre la eliminación y el flujo que pasa por la membrana (Zhang y col., 2021), las membranas de UF son altamente desarrolladas para tratamiento de agua por su permeabilidad, de cerca de decenas de cientos de  $\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$ , son usadas en combinación con otras tecnologías de membranas para remover contaminantes pequeños (Ren y col., 2021). La filtración por membrana separa sólidos del gas y sólidos del líquido gracias a sus propiedades mecánicas (Gui y col., 2021), esta tecnología de tratamiento puede generar efluentes de calidad, adecuada para aplicaciones de reuso de agua (Al-Maas y col., 2021) y (Chollom y col., 2017). El ensuciamiento de la membrana es un factor clave que influye en la sostenibilidad, la seguridad y duración de ellas depende de factores como propiedades de membrana, flujo de operación y calidad del agua a tratar (Chang y col., 2019). La

efectividad del tratamiento se puede lograr aplicando sistemas híbridos. La combinación adecuada de operaciones unitarias puede generar una eliminación de impurezas de casi el 100% (Rajca, 2012).

### 1.2.3 Adsorbentes

El carbón activado tiene una estructura porosa y área de superficie interna grande, por lo cual tiene una alta capacidad de adsorción. Los mecanismos de adsorción como la fisisorción y/o la quimisorción permiten que los contaminantes pasen de la superficie líquida a la sólida (Jjagwe y col., 2021). Industrialmente se usa como adsorbente, siendo el más usado para el tratamiento de aguas residuales (Oladimeji y col., 2021). La forma granular del carbón activado es muy versátil y se puede usar para remover microcontaminantes orgánicos como el per y polifluoroalquilo, fármacos y materia orgánica (Xiao y col., 2020). La adsorción con el carbón activado, se ha propuesto como pretratamiento y ha mostrado mejorar el flujo en las filtraciones con membranas, por la reducción de ensuciamiento (Schumann y col., 2020).

## 1.3 Membranas

### 1.3.1 Geometría de las membranas

Hay diferentes tipos de módulos de membranas usadas en el tratamiento del agua, como lo son las membranas en espiral y de fibra hueca que llevan a rendimientos satisfactorios, sin embargo el uso de estos módulos depende de la composición del agua en alimentación y de la funcionalidad de la planta (Aladwani y col., 2021).

Esta tecnología se usa a gran escala en industrias para desalinizar agua y tratar aguas residuales. Cumplen con los criterios de sostenibilidad en términos de impactos ambientales, uso de suelo, facilidad de uso, flexibilidad y adaptabilidad (Le y Nunes, 2016). Las membranas de fibra hueca se han estudiado para varios procesos, solo que su mayor aplicación es para la permeación de gas (Arregoitia-Sarabia y col., 2021).

### 1.3.2 Membrana en espiral

Es el tipo de configuración más común en el mercado, tiene una mayor proporción de volumen por área superficial y se obtiene más recuperado que las demás

configuraciones. En la Figura 1 se observa que la configuración en espiral contiene además de la membrana, canales de entrada y salida, espaciadores, un tubo de permeado y una válvula de presión (Lin y col., 2022). Para los canales de alimentación se puede usar el flujo diagonal, donde se bloquean ciertas regiones de entrada y salida con pegamento para incrementar la velocidad del flujo del líquido. Los espaciadores en forma de red con una estructura de doble capa de filamentos que se cruzan entre sí. Son esenciales en estos módulos, se usan para separar las hojas de membrana creando canales de alimentación y sirve de promotor de turbulencia que incrementa el flujo de mezclado, la transferencia de masa y minimiza la concentración de la polarización (Lin y col., 2021). Las membranas y los separadores se ponen de forma alternada envolviendo el tubo de permeado, así formando los canales de alimentación y de permeado (Gu y col., 2017). Modificar propiedades de los espaciadores como el grueso, orientación y el ángulo del filamento afecta la porosidad de los espacios del canal de alimentación así reduciendo el impacto del ensuciamiento en la membrana (Siddiqui y col., 2017).

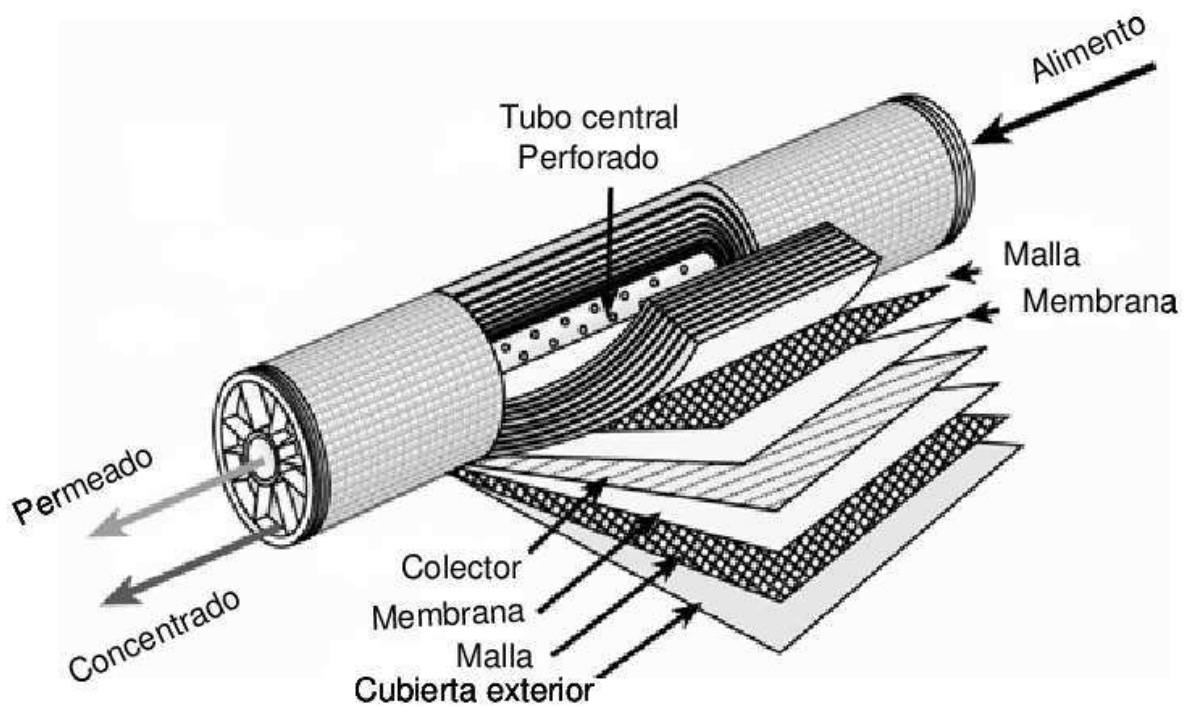


Figura 1. Diseño de la membrana en espiral (Sotto, 2008).



### 1.3.3 Tipos de membranas

En el Cuadro 1 se pueden comparar algunos ejemplos de membranas, así como la función específica de los materiales de cada una.

Cuadro 1. Tipos de membranas

<b>Membrana</b>	<b>Materiales</b>	<b>Función</b>	<b>Descrito por</b>
Híbrido de fluoruro de polivinilideno	Fluoruro de polivinilideno (PVDF)	Utilizado para el desarrollo de membranas de UF debido a su buena resistencia química, estabilidad térmica e hidrolítica y resistencia mecánica	Huang y col., 2017
	Nanotubos de carbono de paredes múltiples modificados (MWNT)	Resaltan sus propiedades por tener alta área específica, propiedades mecánicas prominentes y trabajabilidad, evitan el ensuciamiento y son autolimpiantes	
	n-halamina y siloxano	Utilizado para fabricar membranas antimicrobianas, ambos aseguraron propiedades antibacterianas y autolimpiantes.	
Matriz mixta de grafeno funcionalizada con	Óxido de grafeno	Exhiben mejor rendimiento de permeación y	Zhang y col., 2019

guanidilo/ polisulfona (GFG / PSF)		antiincrustante, excelentes propiedades fisicoquímicas como conductividad eléctrica y térmica, alta área de superficie y resistencia mecánica	
	Grafeno funcionalizada con guanidilo (GFG)	Adsorbe selectivamente péptidos monofosfato y péptidos polifosfato como un nuevo adsorbente bifuncional.	
Base de PVC reforzada con nanopartículas de p-aramida sintetizadas <i>in situ</i>	Cloruro de polivinilo (PVC)	Puede mejorar su limpieza y las propiedades mecánicas de la membrana	Peng y col., 2022
	Nanofibras de p-aramida (ANFs)	Propiedades mecánicas, mejoró la hidrofilia de la superficie, las propiedades antiincrustantes y tiene buena dispersión, se mantuvo un buen rendimiento de rechazo y flujo.	
Membranas fenólicas	Resoles sintetizado por polimerización de fenol y	Capaces de formar supramoléculas con polímeros moldeadores por interacciones de	Lan y col., 2021

	formaldehído en reacción catalizada por una base	puentes de hidrógeno.	
	Polietilenglicol (PEG)	El tamaño del poro se puede regular de 1.3 a 9.8 nm cambiando la proporción de PEG.	
Modificadas por nanotubos de carbono a base de cenizas voladoras	Nanotubos de carbono (CNT)	Mejoran la hidrofilia y la naturaleza antiincrustante de las membranas y su estabilidad térmica	Singh y col., 2021
	CNT modificadas con cenizas voladoras	Con características antiincrustantes y de separación mejoradas.	

A razón de la diversidad y complejidad de los distintos contaminantes del agua, no solo un método es suficiente para tratar combinaciones de los contaminantes. Para ello se diseñan sistemas de tratamiento de agua con distintas unidades para eliminar los contaminantes seleccionados, con una resolución de hasta 99% de limpieza en un sistema por lotes (Yu y col., 2018).

## 2. HIPÓTESIS

El acoplamiento de los métodos de filtración, microfiltración y adsorción en combinación aumentará el rendimiento en la eliminación de los contaminantes seleccionados del agua contaminada artificialmente utilizada, ya que por las características de los contaminantes y la eficiencia de los métodos se obtendrá como resultado agua que cumpla con los parámetros establecidos por normas mexicanas.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 General

Definir un tren de tratamiento de agua contaminada artificialmente empleando filtración, microfiltración y adsorbentes como métodos de descontaminación, con el fin de obtener agua de calidad para su reutilización.

#### 3.2 Específicos

1. Desarrollar una configuración óptima de módulos de filtración, microfiltración y adsorbentes, enfocada en la eliminación eficiente de coliformes fecales, microplásticos y paracetamol en agua contaminada artificialmente.
2. Evaluar la eficiencia de remoción de coliformes fecales, microplásticos y paracetamol del tren de tratamiento diseñado, mediante la comparación de distintas configuraciones y análisis cuantitativo de la calidad del agua tratada, asegurando que se disminuya la concentración inicial de los contaminantes.

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 4.1 Materiales

Los materiales para la membrana de microfiltración fueron polvo de fluoruro de polivinilideno (PVDF), 1-methyl-2-pyrrolidone (1MP), polivinilpirrolidona (PVP, PM = 24,000 Da), 5,5-dimetilhidantoína, 3-cloropropiltriétoxosilano, epiclorhidrina, agua desionizada, nanotubos de carbono de pared múltiple modificados (MWNT, por sus siglas en inglés), con una longitud promedio de 6-9  $\mu\text{m}$ , HCl,  $\text{HNO}_3$ , NaOH y acetona (Sigma Aldrich, St. Louis, Estados Unidos de América). Para formar el espiral de la membrana se utilizó pegamento de silicón caliente, tubo de cloruro de polivinilo clorado (CPVC) sanitario de 1.27 cm y tubo de policloruro de vinilo (PVC, por sus siglas en inglés) sanitario de 1.905 cm de diámetro, conexiones de rosca y adaptadores de PVC, espaciadores de malla de fibra de vidrio recubierta de PVC flexible con espacios de 1.44  $\text{mm}^2$  y plastiloka (Kolaloka, Tlalnepantla, México).

Para el módulo de adsorción se utilizó carbón, agua destilada y cloruro de calcio de (Sigma Aldrich, St. Louis, Estados Unidos de América), de la misma manera tubo de PVC sanitario de 1.905 cm de diámetro, conexiones de codo de 90° de PVC (Truper, Jilotepec, México).

Para preparar el agua contaminada artificialmente se usaron microplásticos generados a partir de una botella de polietileno tereftalato (PET). Paracetamol comercial (Tylenol, México) de 500 mg y *E. coli* obtenidos en la Universidad Autónoma de Querétaro proporcionados por el laboratorio del Parque Biotecnológico. Para bombear el agua contaminada artificialmente por el sistema se usó una bomba de agua (McMillan, PG 6500).

Para el análisis de contaminantes se usó agar y caldo LB, agua destilada (Sigma Aldrich, St. Louis, Estados Unidos de América), incubadora (Incubadora Orbital, INO 650V-9), Cámara Neubauer para cuantificar células de coliformes. Para cuantificación del paracetamol se usó el equipo de espectrofotometría (Thermo Scientific, Genesys 10S UV-VIS), se usó un baño ultrasónico (Branson, 1800) para disolver completamente la tableta de paracetamol. Para la cuantificación de

microplásticos se usaron filtros de papel, el horno (Dynamica, Air performance) y balanza analítica (Ohaus,Pioneer).

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Membrana de filtración

#### 4.2.1.1 Ensamblaje de la membrana en configuración de espiral

En un tubo de CPVC sanitario de 1.27 cm de diámetro y 21.5 cm de largo se colocaron secuencialmente sobre toda la superficie perforaciones de 6.35 mm. Después se adaptó en un extremo del tubo un anillo de plastiloka y del otro extremo se tapó por completo la entrada y se pegó con silicón caliente la malla de fibra de vidrio recubierta de PVC (ancho 21.5 cm, largo 44.5 cm). La membrana fue enrollada alrededor del tubo y se colocó dentro de un tubo de PVC del diámetro final de 1.905 cm, que se tapó con las roscas adaptadas para la alimentación y salida del agua (Wright y col., 2019).

### 4.2.2 Membrana de microfiltración en espiral

#### 4.2.2.1 Purificación y funcionalización de MWNTs

Los MWNTs se purificaron usando una solución acuosa de HCl 0.5 M durante 1 h. Después se filtraron y lavaron con agua destilada, y se dejaron secar a 40 °C. Los nanotubos de carbono fueron oxidados usando HNO<sub>3</sub> a 160 °C durante 6 h, resultando en O-MWNTs. Posteriormente, se lavaron con agua y etanol, y se dejaron secar a 40 °C.

#### 4.2.2.2 Síntesis de 3-glicidil-5, 5-dimetilhidantoína

Se disolvieron 0.05 mol de 5-dimetilhidantoína y 0.05 mol de NaOH en 40 mL de agua desionizada, agitando durante 10 min a temperatura ambiente. Después, se agregaron 0.05 mol de epiclorhidrina a la mezcla y se dejó en agitación por 10 h. El agua se removió de la mezcla evaporando a baño María a 100 °C durante 5 h. El epóxido de hidantoína resultante se disolvió en 50 mL de acetona y se filtró para eliminar el subproducto de NaCl. La fase oleosa fue 3-glicidil-5,5-dimetilhidantoína, la cual se recuperó usando un embudo de decantación.

#### 4.2.2.3 Preparación de N-Si-MWNT

Para preparar el N-MWNT, los O-MWNT se dispersaron en una solución de 3-glicidil-5, 5-dimetilhidantoína al 10% con NaOH al 1%, durante 30 min a 60 °C. Después se filtraron en papel y se curaron a 60 °C durante 1 h, y luego a 105 °C durante 10 min. Los N-MWNT se sumergieron en una solución acuosa de 3-cloropropiltriétoxissilano al 6% en agua destilada durante 15 min, se filtraron en papel y se curaron a 90 °C durante 1 h para lograr MWNT funcionalizados (N-Si MWNT).

#### 4.2.2.4 Preparación de membranas híbridas de PVDF

La solución se preparó con (% peso/peso) PVDF (16), PVP (2), N-Si-MWNTs (0.3) y (81.7) de 1MP como solvente, se homogeneizó mezclando en baño María a 70 °C hasta que se obtuvo una mezcla sin grumos de algún polvo. La membrana se fabricó por la vía de NIPS por sus siglas en inglés (Non-solvent Induced Phase Separation) a  $25 \pm 1$  °C. Se usó una varilla de vidrio para esparcir la solución en una película delgada sobre papel encerado, y estas se sumergieron inmediatamente en agua desionizada como el líquido de coagulación. Luego, se sumergieron por 24 h para remover los solventes residuales (Huang y col., 2017).

#### 4.2.2.5 Ensamblaje de la membrana en configuración de espiral

Para el ensamblaje se hizo de la misma manera que se hizo con el módulo de filtración, de la sección (4.2.1.1), se colocó un separador (ancho 21.5 cm, largo 22.5 cm) y la membrana con los nanotubos funcionalizados tuvo una medida de ancho 21.5 cm, largo 11.5 cm.

### 4.2.3 Módulo de adsorción

#### 4.2.3.1 Preparación del carbón activado

Se seleccionaron pedazos de carbón de mediano tamaño, estos se licuaron hasta que quedaron partículas pequeñas, se pasaron por un colador para eliminar el polvo y solo se conservaron las partículas, se lavaron con agua destilada hasta que no salió polvo en el agua, y se pusieron a secar en el horno a 80 °C durante 30 min. Posteriormente, se dejaron reposando por 24 h en una solución de agua y cloruro



de calcio en una proporción de 3:1. Pasado el tiempo, se retiró el líquido excedente y se pusieron en el horno por 3 h a 100 °C.

#### 4.2.3.2 Ensamble del módulo de carbón activado

Para este módulo se seleccionó el carbón activado, se puso dentro de un tubo de PVC de 21.5 cm de largo y un diámetro de 1.905 cm, al inicio y al final del tubo se pegó una malla para evitar el paso de los adsorbentes, y se taparon con las roscas adaptadas para la alimentación y salida del agua.

#### 4.2.4 Agua contaminada artificialmente

##### 4.2.4.1 *E. coli*

Se inocularon 300 mL de caldo LB con *E. coli*, y se incubaron durante 24 h a 30 °C. Se preparó una solución salina con una concentración de 0.9 g/100 mL de agua para obtener las diluciones, y en varios tubos se pusieron 9 mL de la solución. Después del tiempo de incubación, se puso 1 mL del caldo inoculado en el primer tubo y se hizo la dilución. En distintas cajas petri con agar LB se inocularon 100 µL de las diluciones y se contaron las cajas que tenían un número contable de colonias para poder sacar el promedio de unidades formadoras de colonias (UFC)/mL del caldo inicial y poder conocer la cantidad de mililitros que se tendrán que agregar al agua contaminada artificialmente.

##### 4.2.4.2 Microplásticos

Para obtener los microplásticos se lijó y cortó una botella de PET hasta tener partículas muy pequeñas de plásticos, se midieron las partículas visiblemente más grandes para medir que fueran menores a 1 mm de tamaño, en caso de que no fueran menores a ese tamaño se separaron, se pesó la cantidad necesaria para generar el agua contaminada artificialmente.

#### 4.2.4.3 Paracetamol

Se molieron 3 pastillas de paracetamol en un mortero hasta que se tuvo un polvo fino, después se disolvieron en 600 mL de agua destilada y se pusieron en baño ultrasónico por 60 min para que se disolviera completamente el polvo.

#### 4.2.4.4 Concentración de contaminantes

Para el agua contaminada artificialmente se usó una concentración de paracetamol de 500 mg/L en agua destilada, 0.375 g de microplásticos por litro y  $2.410 \times 10^6$  UFC/L de *E. coli*. En total se prepararon 3 litros de agua para tratar 1 litro de agua por cada configuración.

#### 4.2.5 Configuraciones a probar en el ensamblaje del tren

##### 4.2.5.1 Filtración-Microfiltración-Adsorción

Primero se puso el módulo de filtración, luego el módulo de microfiltración y por último se conectó el módulo de adsorción. En total, se corrió por lotes una cantidad de 1 L de agua contaminada artificialmente y posteriormente se evaluó la calidad del agua obtenida y el ensuciamiento de la membrana. Se recuperó toda el agua después del tratamiento.

##### 4.2.5.2 Adsorción-Filtración-Microfiltración

Primero se puso el módulo de adsorción, luego el módulo de filtración y por último se conectó el módulo de microfiltración. En total, se corrió por lotes una cantidad de 1 L de agua contaminada artificialmente y posteriormente se evaluó la calidad del agua obtenida y el ensuciamiento de la membrana. Se recuperó toda el agua después del tratamiento.

##### 4.2.5.3 Filtración-Adsorción-Microfiltración

Primero se puso el módulo de filtración, luego el módulo de adsorción y por último se conectó el módulo de microfiltración. En total, se corrió por lotes una cantidad de 1 L de agua contaminada artificialmente y posteriormente se evaluó la calidad del agua obtenida y el ensuciamiento de la membrana. Se recuperó toda el agua después del tratamiento.

#### 4.2.6 Cuantificación de contaminantes.

##### 4.2.6.1 Cuantificación de coliformes fecales.

Los CF del agua tratada se cuantificaron contando UFC. Del agua tratada se tomaron 100  $\mu$ L para inocular una caja petri con agar LB, si era necesario se hicieron diluciones de la misma manera que se explica en la sección 4.2.4.1, y se incubaron por 24 h a 30 °C. Después del tiempo, se reportaron las UFC/mL.

Se hizo un frotis de la membrana para comprobar el ensuciamiento de la misma y se sembró en agar LB, se incubó a 30 °C durante 24 h y se contaron las colonias de la placa. Se expresaron los resultados como UFC/mL de muestra (George, 2004).

##### 4.2.6.2 Cuantificación de paracetamol.

Se midió la concentración de paracetamol usando el equipo de espectrofotometría. Primero se molió una tableta de paracetamol de 500 mg hasta tener un polvo, y se pesaron 0.06 g. Se suspendió en 100 mL de agua destilada para obtener la concentración de agua contaminada artificialmente. Se llevó por 10 min al baño ultrasónico para que el polvo se disolviera, luego se filtró para retirar el excipiente insoluble. Se hicieron diluciones de concentraciones de 0.05, 0.025, 0.0125, 0.00625, 0.00312, 0.00156 y 0.00078 (mg/mL), se pusieron en una celda de cuarzo 1 mL de cada concentración de la dilución y de la muestra del agua tratada, y se leyó a 254 nm en el espectrofotómetro. Con las absorbancias obtenidas se pudo hacer la curva de calibración y obtener la ecuación para obtener la concentración de paracetamol del agua tratada. En una celda de cuarzo se puso 1 mL de agua tratada de cada configuración y se sacó la concentración de paracetamol (Pérez y Rojas, 2016).

##### 4.2.6.3 Cuantificación de microplásticos.

Se puso a secar en el horno a 70 °C por 30 min el papel que se usó para filtrar. Después de hacer el tratamiento de agua y los primeros 2 análisis de cuantificación de contaminantes, se filtró la muestra de cada sistema en papel usando un matraz kitasato, un embudo y una bomba de vacío para acelerar el proceso. El papel con los microplásticos se puso a secar en el horno a 70 °C por 30 min, y luego se pesó cada papel para obtener los g de microplásticos restantes en el agua tratada.

## 5. RESULTADOS

### 5.2.1 Membrana de filtración

Para la membrana de filtración en el tubo perforado se pegó el filtro y se enrolló de forma que se cubrieran los espacios con huecos como se ve en la Figura 2A y B, cuando esta como en la Figura 2C se puede meter el módulo al tubo del tren de tratamiento designado.

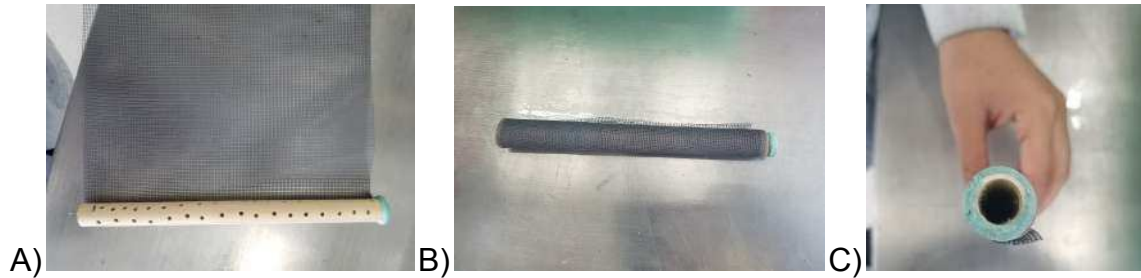


Figura 2. Módulo de filtración y su enrollamiento; A) Tubo perforado con el filtro pegado, B) Filtro en configuración de espiral, C) Salida de agua filtrada

### 5.2.2 Membrana de microfiltración en espiral

#### 5.2.2.1 Preparación de membranas híbridas de PVDF

Después de hacer la funcionalización de los nanotubos de carbono como se ve en la Figura 3A se preparó la mezcla para la membrana como se ve en la Figura 3B, así es como se debe de ver antes de esparcirlo y ponerle el agua desionizada para que se forme la membrana como en la Figura 3C, después de que se solidificara y formaran los poros de la membrana con el agua desionizada se puede proceder a cortar y ensamblar el módulo de microfiltración.

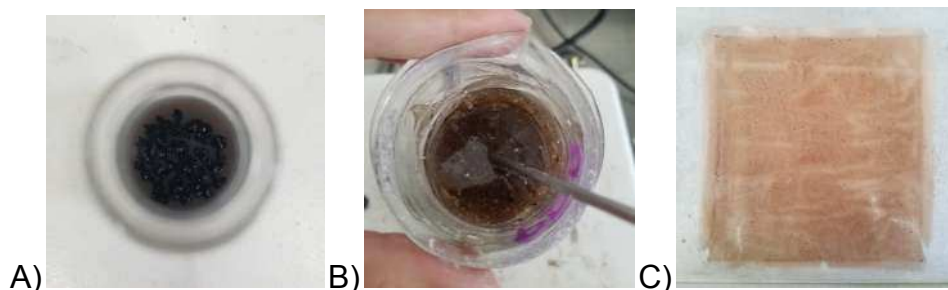


Figura 3. Pasos de la preparación de membrana híbrida de PVF; A) Nanotubos de carbono funcionalizados B) Mezcla para la membrana C) Membrana híbrida de PVDF

### 5.2.2.2 Ensamblaje de la membrana en configuración de espiral

Para el ensamble del módulo de microfiltración en un tubo perforado se pegó el separador de la membrana y encima se puso la membrana y se fue enrollando como se ve en la Figura 4A hasta que quedó totalmente enrollada como en la Figura 4B y después se introdujo en el tubo del tren de tratamiento designado.

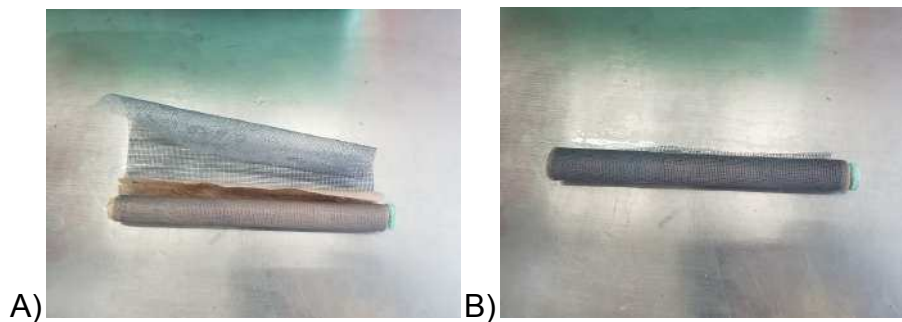


Figura 4. Módulo de microfiltración A) Tubo perforado enrollado con el separador y la membrana, B) Módulo listo para meter en el tubo del tren de tratamiento.

### 5.2.3 Módulo de adsorción

#### 5.2.3.1 Ensamble del módulo de carbón activado

Después de triturar el carbón y activarlo como se ve en la Figura 5A al módulo de adsorción se le puso al final del tubo una red como la Figura 5B para que se pudiera mantener el carbón activado dentro del tubo y este se llenó por completo y se puso otra red para detener el carbón activado.

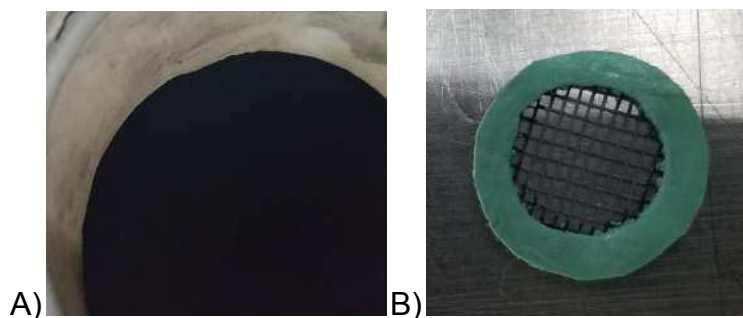


Figura 5. Módulo adsorción A) Carbón activado, B) Red para detener carbón

### 5.2.4 Agua contaminada artificialmente

Se preparó 3 L de agua como se ve en la Figura 6 que se contaminó en total con 1500 mg de paracetamol molido, 1.125 g de microplásticos y  $7.23 \times 10^6$  UFC de *E. coli* y se usó 1 litro de esta agua para cada configuración. El agua presentó un color

turbio blanco y se ven pequeños trozos de microplástico flotando, si se compara con agua totalmente limpia ésta es transparente y no se aprecia nada flotando o en el contenido del agua.



Figura 6. Agua contaminada

## 5.2.5 Configuraciones a probar en el ensamblaje del tren

### 5.2.5.1 Filtración-Microfiltración-Adsorción

En la Figura 7A se muestra el ensamble de todo el tren de tratamiento de la primera configuración que es filtración, microfiltración y adsorción en el último paso, en la Figura 7B se muestra la bomba sumergible ya introducida en el agua contaminada para iniciar el tratamiento.

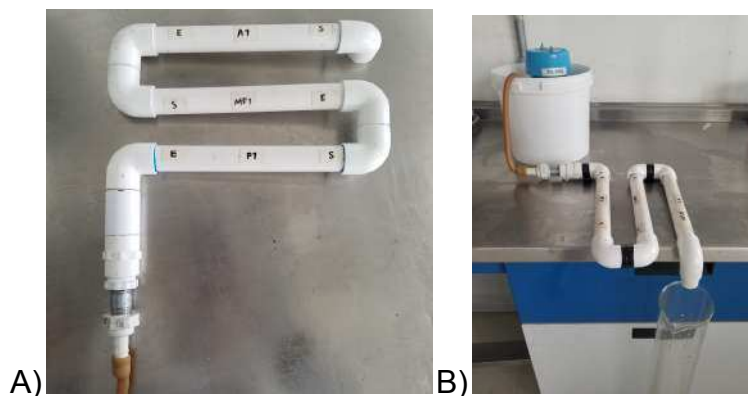


Figura 7. Tren de tratamiento F-MF-A; A) Módulos unidos, B) Sistema conectado con bomba dentro de agua contaminada

Después de que terminara el tratamiento se inoculó en una caja petri el agua tratada y en otra caja una dilución de  $1 \times 10^{-1}$ , se tomó una muestra de la membrana con un hisopo estéril y también se inoculó una caja petri, los resultados se observan en la Figura 8.

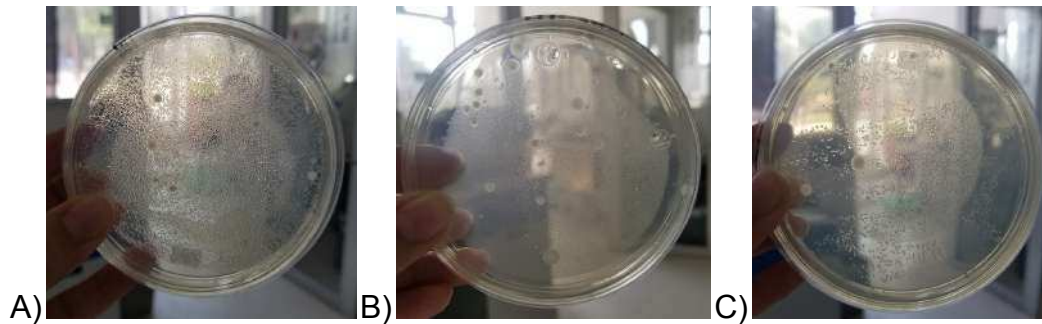


Figura 8. Microbiología de configuración F-MF-A; A) Muestra de agua tratada, B) Dilución del agua tratada  $1 \times 10^{-1}$ , C) Muestra de la membrana

Estos resultados permiten visualizar cuál configuración fue la mejor para la eliminación de *E. coli*, comparado con las otras membranas ésta estaría en segundo lugar. Comparado con el resultado del agua tratada y después de hacer las diluciones y el conteo de colonias para esta configuración fueron  $77 \times 10^4$  UFC/ L, comparado con la concentración inicial como se ve en la Figura 9 se muestra la reducción del contaminante. Esta configuración estaría en segundo lugar.

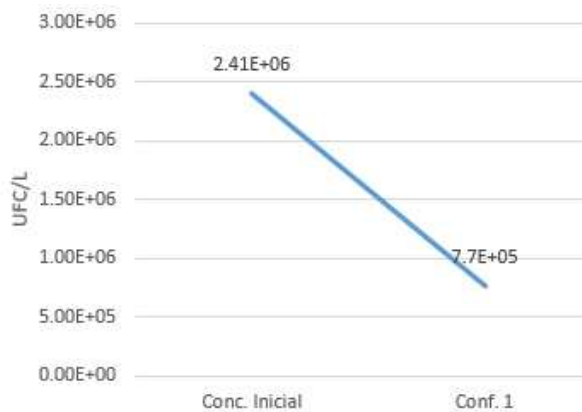


Figura 9. Comparación de concentración inicial de coliformes fecales contra concentración final para la configuración 1.

Después de hacer el análisis de paracetamol por triplicado se obtuvo que la concentración final del paracetamol en el agua tratada fue de 0.067 mg/L como se ve en el Cuadro 2, de igual manera en la Figura 10 se muestra la reducción del contaminante quedando esta configuración en primer lugar.

Cuadro 2. Resultados de concentración de paracetamol configuración F-MF-A

Agua tratada F-MF-A	Absorbancia	Concentración (mg/L)
1	0.034	0.101
2	0.034	0.055
3	0.036	0.045
<b>Concentración final</b>		0.067

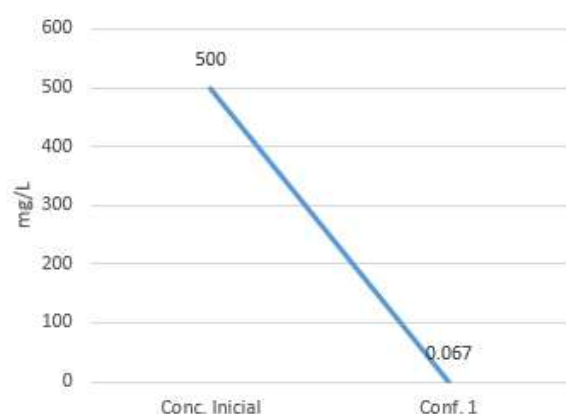


Figura 10. Comparación de concentración inicial de paracetamol contra concentración final para la configuración 1.

Para el resultado de la cuantificación de microplásticos se obtuvo que el peso final de microplásticos fue de 0.013 g como se ve en el Cuadro 3, de igual manera en la Figura 11 se muestra la reducción del contaminante quedando en segundo lugar.

Cuadro 3. Peso en g de microplásticos configuración F-MF-A

Peso papel seco	Peso papel con MP	Peso microplásticos
0.6629	0.6759	0.013



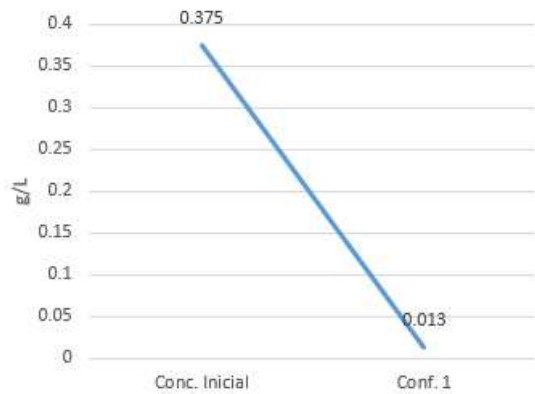


Figura 11. Comparación de concentración inicial de microplásticos contra concentración final para la configuración 1.

Durante el tratamiento se registró el tiempo que se tardaba en tratar el litro de agua contaminada, para esta configuración se tardó un tiempo total de 2 min con 32 seg, quedando en tercer lugar

#### 5.2.5.2 Adsorción-Filtración-Microfiltración

En la Figura 12A se muestra el ensamble de todo el tren de tratamiento de la segunda configuración que es adsorción, filtración y microfiltración en el último paso, en la Figura 12B se muestra la bomba de agua ya introducida en el agua contaminada para iniciar el tratamiento.

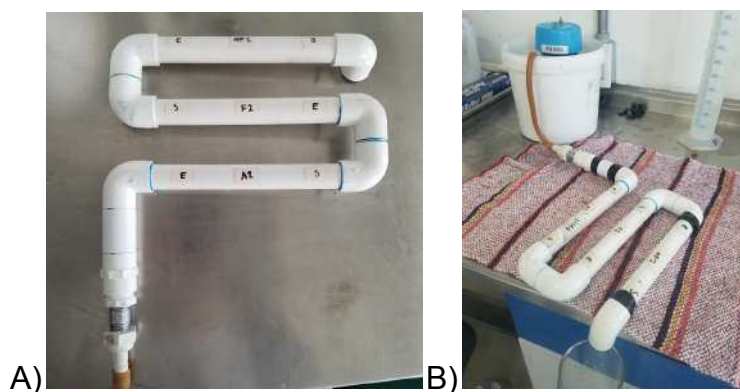


Figura 12. Tren de tratamiento A-F-MF; A) Módulos unidos, B) Sistema conectado con bomba dentro de agua contaminada

Después de que terminara el tratamiento se inoculó en una caja petri el agua tratada y en otra caja una dilución, se tomó una muestra de la membrana con un hisopo estéril y también se inoculó una caja petri, los resultados se observan en la Figura 13.

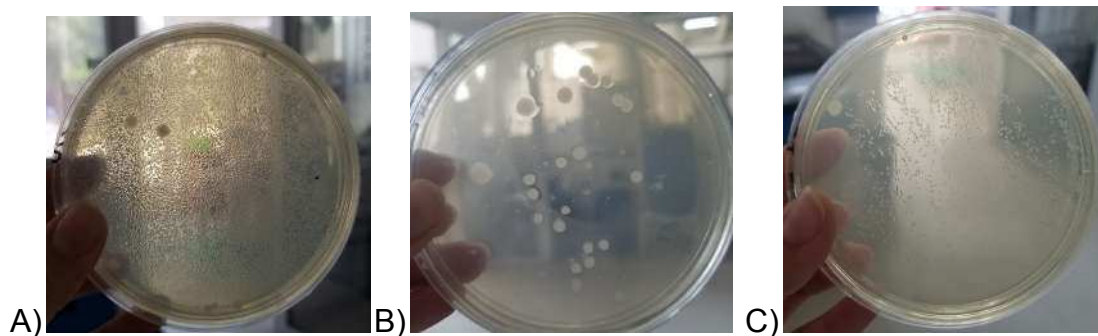


Figura 13. Microbiología de configuración A-F-MF; A) Muestra de agua tratada, B) Dilución del agua tratada  $1 \times 10^{-1}$ , C) Muestra de la membrana.

Estos resultados ayudan a identificar visualmente cuál configuración fue la mejor para la eliminación de *E. coli*, comparado con las otras membranas ésta estaría en primer lugar. Comparado con el resultado del agua tratada y después de hacer las diluciones y el conteo de colonias para esta configuración son  $23.9 \times 10^4$  UFC/L, comparado con la concentración inicial como se ve en la Figura 14 se muestra la reducción del contaminante, por lo que quedaría en primer lugar.

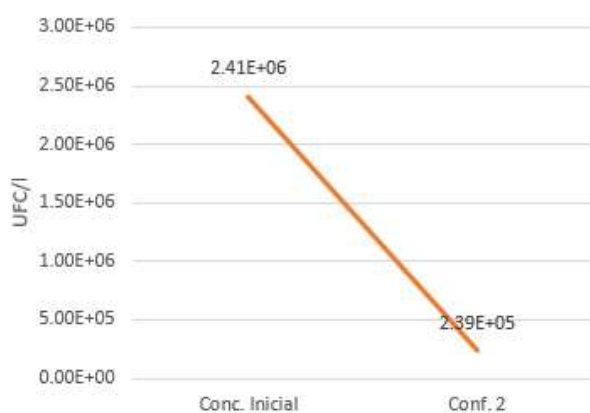


Figura 14. Comparación de concentración inicial de coliformes fecales contra concentración final para la configuración 2.

Después de hacer el análisis de paracetamol por triplicado se obtuvo que la concentración final del paracetamol en el agua tratada fue de 0.263 mg/L como se ve en el Cuadro 4, de igual manera en la Figura 15 se muestra la reducción del contaminante quedando esta configuración en tercer lugar.

Cuadro 4. Resultados de concentración de paracetamol configuración A-F-MF

Agua tratada A-F-MF	Absorbancia	Concentración (mg/L)
1	-0.006	0.304
2	-0.006	0.258
3	0.000	0.228
<b>Concentración final</b>		0.263

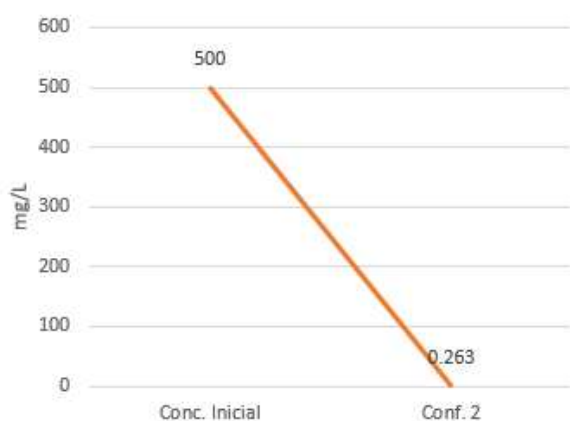


Figura 15. Comparación de concentración inicial de paracetamol contra concentración final para la configuración 2.

Para el resultado de la cuantificación de microplásticos se obtuvo que el peso final de microplásticos fue de 0.0142 g como se ve en el Cuadro 5, de igual manera en la Figura 16 se muestra la reducción del contaminante quedando en tercer lugar.

Cuadro 5. Peso en g de microplásticos configuración A-F-MF

Peso papel seco	Peso papel con mp	Peso microplásticos
0.6414	0.6556	0.0142

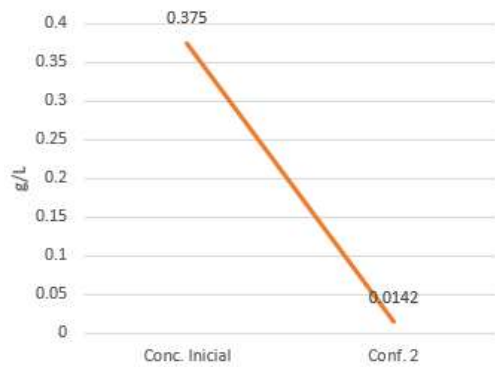


Figura 16. Comparación de concentración inicial de microplásticos contra concentración final para la configuración 2.

Durante el tratamiento se registró el tiempo que se tardaba en tratar el litro de agua contaminada y para esta configuración se tardó un tiempo total de 1 min con 52 seg, quedando en primer lugar.

### 5.2.5.3 Filtración-Adsorción-Microfiltración

En la Figura 17A se muestra el ensamble de todo el tren de tratamiento de la tercera configuración que es, filtración, adsorción y microfiltración en el último paso, en la Figura 17B se muestra la bomba de agua ya introducida en el agua contaminada para iniciar el tratamiento.

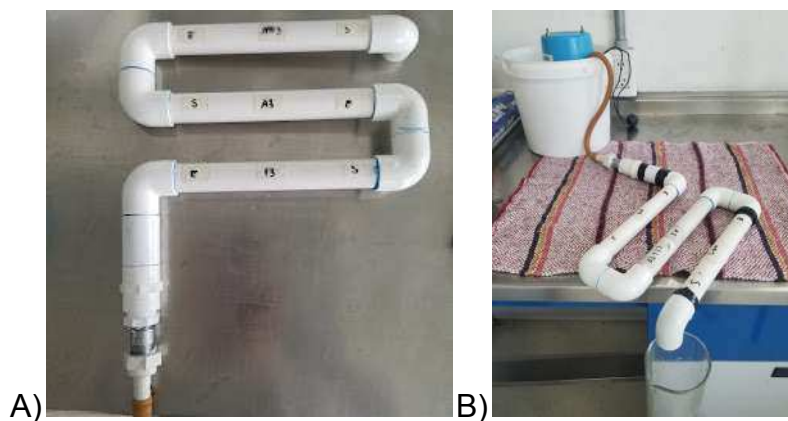


Figura 17. Tren de tratamiento F-A-MF; A) Módulos unidos, B) Sistema conectado con bomba dentro de agua contaminada

Después de que terminara el tratamiento se inoculó en una caja petri el agua tratada y en otra caja una dilución, se tomó una muestra de la membrana con un hisopo

estéril y también se inoculó una caja petri, los resultados se observan en la Figura 18.

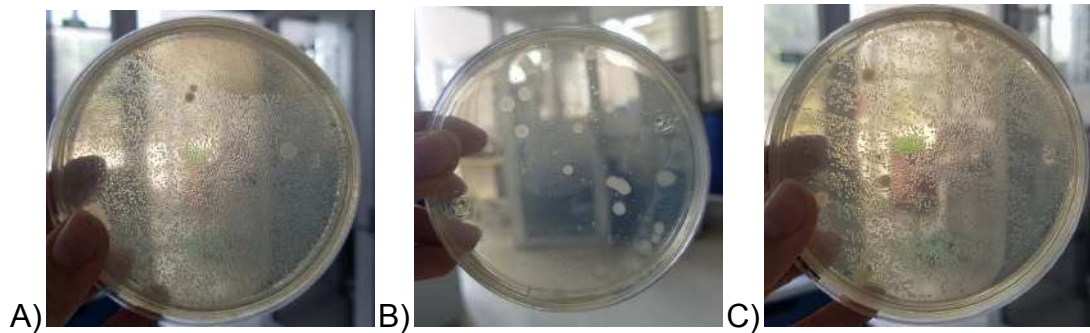


Figura 18. Microbiología de configuración F-A-MF; A) Muestra de agua tratada, B) Dilución del agua tratada  $1 \times 10^{-1}$ , C) Muestra de la membrana

Estos resultados permiten visualizar cuál configuración fue la mejor para la eliminación de *E. coli*, comparado con las otras membranas ésta estaría en tercer lugar. Comparado con el resultado del agua tratada y después de hacer las diluciones y el conteo de colonias para esta configuración son  $110.3 \times 10^4$  UFC/ L, comparado con la concentración inicial como se ve en la Figura 19 se muestra la reducción del contaminante, por lo que quedaría en tercer lugar.

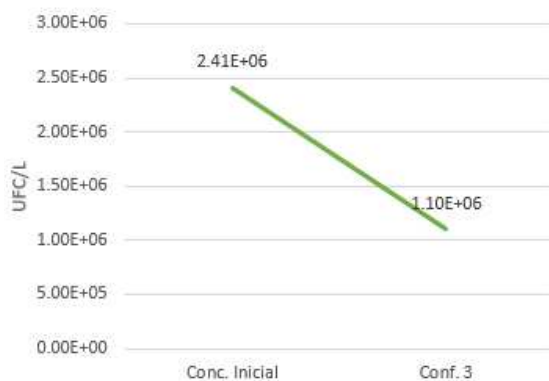


Figura 19. Comparación de concentración inicial de coliformes fecales contra concentración final para la configuración 3.

Después de hacer el análisis de paracetamol por triplicado se obtuvo que la concentración final del paracetamol en el agua tratada fue de 0.189 mg/L como se ve en el Cuadro 6, de igual manera en la Figura 20 se muestra la reducción del contaminante quedando esta configuración en segundo lugar.

Cuadro 6. Resultados de concentración de paracetamol configuración F-A-MF

Agua tratada F-A-MF	Absorbancia	Concentración (mg/L)
1	0.009	0.228
2	0.009	0.182
3	0.014	0.157
<b>Concentración final</b>		0.189

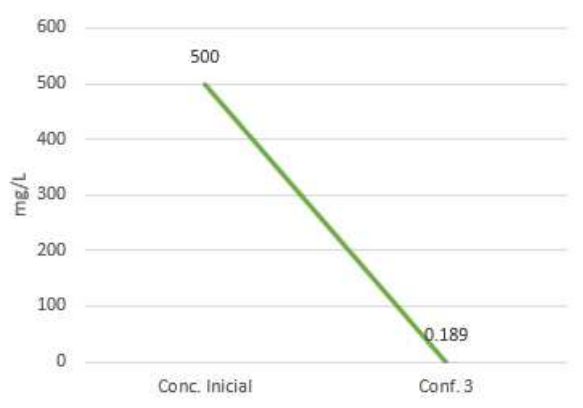


Figura 20. Comparación de concentración inicial de paracetamol contra concentración final para la configuración 3.

Para el resultado de la cuantificación de microplásticos se obtuvo que el peso final de microplásticos fue de 0.0099 g como se ve en el Cuadro 7, de igual manera en la Figura 21 se muestra la reducción del contaminante quedando en primer lugar.

Cuadro 7. Peso en g de microplásticos configuración A-F-MF

Peso papel seco	Peso papel con mp	Peso microplásticos
0.6563	0.6662	0.0099

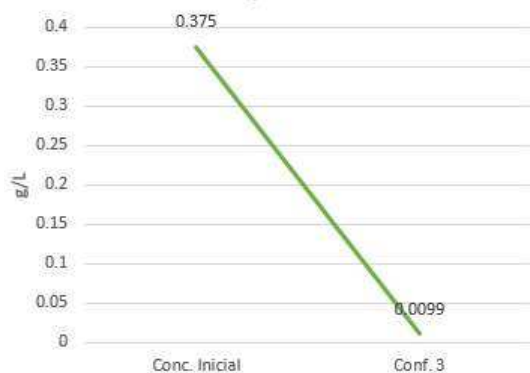


Figura 21. Comparación de concentración inicial de microplásticos contra concentración final para la configuración 3.

Durante el tratamiento se registró el tiempo que se tardaba en tratar el litro de agua contaminada y para esta configuración se tardó un tiempo total de 2 min con 26 seg, quedando en segundo lugar.

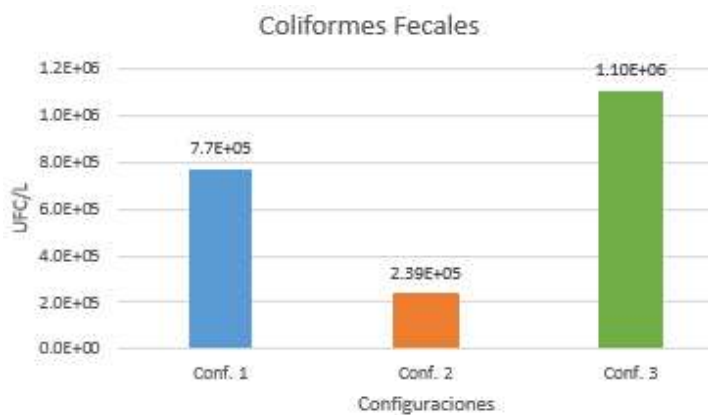
## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se puede visualizar que todas las configuraciones lograron reducir la concentración de contaminantes inicial como podemos ver en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Comparación de resultados del agua tratada contra la concentración inicial de contaminantes.

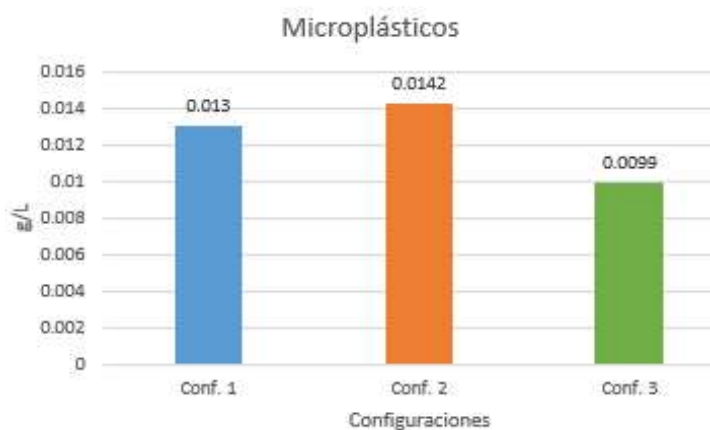
		<b>Coliformes fecales (UFC/L)</b>	<b>Microplásticos (g/L)</b>	<b>Paracetamol (mg/L)</b>
<b>Concentración inicial</b>		2.410 x10 <sup>6</sup>	0.375	500
<b>Conf. 1 (F-MF-A)</b>	<b>Concentración final</b>	77 x10 <sup>4</sup>	0.013	0.067
	<b>% de reducción</b>	68.0%	96.5%	99.98%
<b>Conf. 2 (A-F-MF)</b>	<b>Concentración final</b>	23.9 x10 <sup>4</sup>	0.0142	0.263
	<b>% de reducción</b>	90.08%	96.2%	99.94%
<b>Conf. 3 (F-A-MF)</b>	<b>Concentración final</b>	110.3 x10 <sup>4</sup>	0.0099	0.189
	<b>% de reducción</b>	54.23%	97.36%	99.96%

En la Figura 22 se hace un compilado de los resultados con la finalidad de una visualización más clara sobre las distintas configuraciones para el tratamiento de agua contaminada artificialmente.

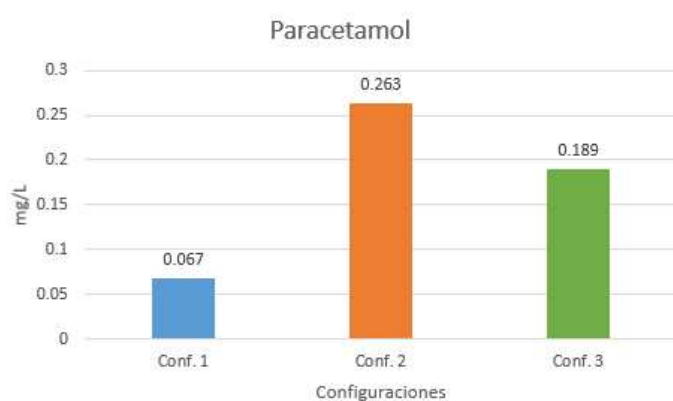


A





B



C

Figura 22. Gráficas de resultados del tratamiento de agua con las distintas configuraciones. A) Comparación de resultados de Coliformes Fecales, B) Comparación de resultados de Microplásticos, C) Comparación de resultados de Paracetamol

Tomando en cuenta estos resultados y los resultados del ensuciamiento de la membrana y el tiempo del tratamiento podemos considerar que la mejor configuración es F-MF-A según el Cuadro 9. La configuración de filtración, microfiltración y adsorción en combinación aumentó el rendimiento en la eliminación de los contaminantes seleccionados del agua contaminada artificialmente utilizada.

Cuadro 9. Comparación de todos los resultados

	CF	MP	PA	Membrana	Tiempo
<b>(F-MF-A)</b>	2°	2°	1°	2°	3°
<b>(A-F-MF)</b>	1°	3°	3°	1°	1°
<b>(F-A-MF)</b>	3°	1°	2°	3°	2°

Hay muchos factores que se pueden mover para hacer un tren de tratamiento de agua más efectivo, para quitar más contaminantes y que tenga un menor ensuciamiento de la membrana y que pueda estar en un tiempo más corto.

En el cuadro 10 podemos ver una comparación de la disminución de contaminantes que tuvo el tren de tratamiento con la configuración F-MF-A y la disminución de los mismos contaminantes que tuvieron en otros estudios expresados en el porcentaje de disminución.

Cuadro 10. Comparación de resultados del tratamiento de agua realizado y de otros estudios, es su porcentaje de disminución.

	<b>F-MF-A</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Resultados</b>	<b>Referencia</b>
<b>CF</b>	68.04%	1. Lodos activados y humedal construido 2. Proceso fenton	1. 11 h 2. 15 min	1. 99.92% 2. 100%	1. Muñoz-Nava y col., 2017 2. Morillo y col., 2019
<b>MP</b>	96.53%	1. Bioreactores de Membrana 2. Filtración por arena	1. 2 h 2. 1 día	1. 99.5 % 2. 85%	1. Lv y col., 2019 2. Sarkar y col., 2021
<b>Pa</b>	99.98%	1. Degradación biocatalítica con TiO <sub>2</sub> 2. Planta de tratamiento de aguas residuales	1. 1 h 2. 1 día	1. 100% (degradación) 2. 67 %	1. Ponce Álvares, 2015 2. Ibarra Rodríguez y col., 2023

## 7. CONCLUSIONES

Basándose en los resultados obtenidos y la discusión correspondiente, se puede concluir que todas las configuraciones evaluadas lograron reducir la concentración de contaminantes iniciales en el agua contaminada artificialmente utilizada en el estudio, demostrando que la combinación de distintos sistemas de tratamiento de agua sirven para reducir contaminantes de interés. Al analizar en detalle los datos presentados y la discusión relacionada, se observa que la Configuración 1 F-MF-A (Filtración-Microfiltración-Adsorción) mostró el mejor rendimiento en la eliminación de los contaminantes seleccionados, especialmente en cuanto a la reducción de coliformes fecales y microplásticos.

La membrana híbrida de PVF con los nanotubos funcionalizados ya ayudan a reducir el ensuciamiento de la misma, y ahora poniendo etapas antes del proceso de microfiltración se reduce aún más el ensuciamiento, dándole más vida útil al tren de tratamiento. Al considerar el ensuciamiento de la membrana y el tiempo de tratamiento, se confirma que la configuración F-MF-A se destaca como la más eficaz entre las evaluadas. Esta configuración, al combinar los procesos de filtración, microfiltración y adsorción, demostró un aumento significativo en la eliminación de contaminantes, manteniendo un nivel aceptable de ensuciamiento de la membrana y un tiempo razonable de tratamiento.

Es importante destacar que existen varios factores que pueden influir en la efectividad de un tren de tratamiento de agua, como la selección de materiales, la optimización de los procesos, y la configuración del sistema. Por lo tanto, para mejorar aún más el rendimiento del tratamiento de agua y reducir el ensuciamiento de la membrana, así como el tiempo de tratamiento, se pueden explorar diferentes estrategias y ajustes en el diseño del sistema.

En resumen, los resultados obtenidos respaldan la conclusión de que la configuración F-MF-A es la más efectiva entre las evaluadas en este estudio específico. Sin embargo, se sugiere seguir investigando y refinando el diseño del sistema para maximizar la eficiencia y la efectividad del tratamiento de agua en futuros proyectos y aplicaciones prácticas.

## 8. REFERENCIAS

**Abu Hasan, H., Muhammad, M. H., & Ismail, N. 'izzati. (2020).** A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources. *Journal of Water Process Engineering*, 33(101035), 101035.

**Aladwani, S. H., Al-Obaidi, M. A., & Mujtaba, I. M. (2021).** Performance of reverse osmosis based desalination process using spiral wound membrane: Sensitivity study of operating parameters under variable seawater conditions. *Cleaner Engineering and Technology*, 5(100284), 100284. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100284>

**Al-Maas, M., Hussain, A., Minier Matar, J., Ponnamma, D., Hassan, M. K., Al Ali Al-Maadeed, M., Alamgir, K., & Adham, S. (2021).** Validation and application of a membrane filtration evaluation protocol for oil-water separation. *Journal of Water Process Engineering*, 43(102185), 102185. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102185>

**Arregoitia-Sarabia, C., González-Revuelta, D., Fallanza, M., Ortiz, A., & Gorri, D. (2021).** Polyether-block-amide thin-film composite hollow fiber membranes for the recovery of butanol from ABE process by pervaporation. *Separation and Purification Technology*, 279(119758), 119758. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119758>

**Ayuso, M. (2015, marzo 4).** Los graves peligros del paracetamol: “Su uso continuado tiene efectos que desconocíamos”. *El Confidencial*. [https://www.elconfidencial.com/alma-corazon-vida/2015-03-04/los-peligros-del-paracetamol-su-uso-continuado-tiene-efectos-que-desconociamos\\_721228/](https://www.elconfidencial.com/alma-corazon-vida/2015-03-04/los-peligros-del-paracetamol-su-uso-continuado-tiene-efectos-que-desconociamos_721228/)

**Benyekkou, N., Ghezzar, M. R., Abdelmalek, F., & Addou, A. (2020).** Elimination of paracetamol from water by a spent coffee grounds biomaterial. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 14(100396), 100396.

**Castro-Pastrana, L. I., Cerro-López, M., Toledo-Wall, M. L., Gómez-Oliván, L. M., & Saldívar-Santiago, M. D. (2021).** Análisis de fármacos en aguas residuales de tres

hospitales de la ciudad de Puebla, México. *Ingeniería del agua*, 25(1), 59. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13660>

**Chang**, H., Li, T., Liu, B., Chen, C., He, Q., & Crittenden, J. C. (2019). Smart ultrafiltration membrane fouling control as desalination pretreatment of shale gas fracturing wastewater: The effects of backwash water. *Environment International*, 130(104869), 104869. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.063>

**Chollom**, M. N., Pikwa, K., Rathilal, S., & Pillay, V. L. (2017). Fouling mitigation on a woven fibre microfiltration membrane for the treatment of raw water. *South African journal of chemical engineering*, 23, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2016.12.003>

**Deng**, S., Yan, X., Zhu, Q., & Liao, C. (2019). The utilization of reclaimed water: Possible risks arising from waterborne contaminants. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 254(Pt A), 113020.

**Dharwal**, M., Parashar, D., Shehu Shuaibu, M., Garba Abdullahi, S., Abubakar, S., & Baba Bala, B. (2020). Water pollution: Effects on health and environment of Dala LGA, Nigeria. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.496>

**Divya**, A. H., & Solomon, P. A. (2016). Effects of some water quality parameters especially total coliform and fecal coliform in surface water of chalakudy river. *Procedia technology*, 24, 631–638.

**El Boujnouni**, H., Nait Balla, K., Belkadi, B., & Rahouti, M. (2021). Comparison between the recovery rate of three concentration protocols of water samples intended for analysis by Molecular Biology: Membrane filtration, filtration on gauze pad and centrifugation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.004>

**Fito**, J., & Van Hulle, S. W. H. (2021). Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. *Environment Development and Sustainability*, 23(3), 2949–2972.

**Fundación Aquae. (2018).** Microplásticos en la tierra, en el agua dulce y en el mar. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/dia-mundial-del-medio-ambiente-microplasticos-en-la-tierra-en-el-agua-dulce-y-en-el-mar/>

**George, I., Anzil, A., & Servais, P. (2004).** Quantification of fecal coliform inputs to aquatic systems through soil leaching. *Water Research*, 38(3), 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.10.022>

**Gu, B., Xu, X. Y., & Adjiman, C. S. (2017).** A predictive model for spiral wound reverse osmosis membrane modules: The effect of winding geometry and accurate geometric details. *Computers & chemical engineering*, 96, 248–265. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.07.029>

**Gui, W., Liu, J., Song, X., Zhang, H., Lin, J., & Luan, B. (2021).** A new microfiltration membrane with three-dimensional reticular architecture for Nano-pollutants removal from wastewater. *Progress in Natural Science: Communication of State Key Laboratories of China*. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2021.04.002>

**Hairom, N. H. H., Soon, C. F., Mohamed, R. M. S. R., Morsin, M., Zainal, N., Nayan, N., Zulkifli, C. Z., & Harun, N. H. (2021).** A review of nanotechnological applications to detect and control surface water pollution. *Environmental Technology & Innovation*, 24(102032), 102032.

**Huang, Y.-W., Wang, Z.-M., Yan, X., Chen, J., Guo, Y.-J., & Lang, W.-Z. (2017).** Versatile polyvinylidene fluoride hybrid ultrafiltration membranes with superior antifouling, antibacterial and self-cleaning properties for water treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 505, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.05.07>

**Ibarra Rodríguez, D., Arellano García, I. (2023).** Aguas residuales, plantas de tratamiento y contaminantes emergentes. (s/f). Ciatej.mx. Recuperado el 20 de abril de 2024, de <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Aguas-residuales--plantas-de-tratamiento-y-contaminantes-emergentes/337>

**Iberdrola.** (2022). ¿Cómo nos afectan los microplásticos? Qué son los microplásticos. Recuperado el 19 de abril de 2023, de <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/microplasticos-amenaza-para-la-salud>

**Jjagwe,** J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and application of granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(4), 292–322. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.03.003>

**Koagouw,** W., Arifin, Z., Olivier, G. W. J., & Ciocan, C. (2021). High concentrations of paracetamol in effluent dominated waters of Jakarta Bay, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 169(112558), 112558.

**Lafi,** R., Gzara, L., Lajimi, R. H., & Hafiane, A. (2018). Treatment of textile wastewater by a hybrid ultrafiltration/electrodialysis process. *Genie Des Procèdes [Chemical Engineering and Processing]*, 132, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.08.010>

**Lan,** Q., Feng, C., Ou, K., Wang, Z., Wang, Y., & Liu, T. (2021). Phenolic membranes with tunable sub-10-nm pores for nanofiltration and tight-ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 640(119858), 119858. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119858>

**Le,** N. L., & Nunes, S. P. (2016). Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*, 7, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.02.001>

**Lin,** W., Lei, J., Wang, Q., Wang, X.-M., & Huang, X. (2022). Performance enhancement of spiral-wound reverse osmosis membrane elements with novel diagonal-flow feed channels. *Desalination*, 523(115447), 115447. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115447>

**Lin, W., Zhang, Y., Li, D., Wang, X.-M., & Huang, X. (2021).** Roles and performance enhancement of feed spacer in spiral wound membrane modules for water treatment: A 20-year review on research evolvement. *Water Research*, 198(117146), 117146. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117146>

**Lv, X., Dong, Q., Zuo, Z., Liu, Y., Huang, X., & Wu, W.-M. (2019).** Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies. *Journal of Cleaner Production*, 225, 579–586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.321>

**Matusiak, M., Dragon, K., Gorski, J., Kruc-Fijałkowska, R., & Przybyłek, J. (2021).** Surface water and groundwater interaction at long-term exploited riverbank filtration site based on groundwater flow modelling (Mosina-Krajkowo, Poland). *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 37(100882), 100882.

**Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., & Mahlknecht, J. (2021).** A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *The Science of the Total Environment*, 782(146788), 146788.

**Morillo Semanate, L. D.,** Departamento de Ciencias Nucleares, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, Naranjo Tovar, D. A., Pérez, J., Villacis Oñate, W. E., Vargas Jentzsch, P., Mufloz Bisesti, F., Departamento de Ciencias Nucleares, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencias Nucleares, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencias Nucleares, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencias Nucleares, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional, & Departamento de Ciencias Nucleares, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Escuela Politécnica Nacional. **(2019).** REMOCIÓN DE TENSOACTIVOS Y COLIFORMES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE PROCESOS FENTON. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 931–943. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.12>



**Muñoz-Nava, H., & Baumann, J. (2017).** Remoción de bacterias coliformes en un sistema de lodos activados y humedal construido. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(11), 287. <https://doi.org/10.19136/era.a4n11.913>

**Oladimeji, T. E., Odunoye, B. O., Elehinafe, F. B., Obanla, O. R., & Odunlami, O. A. (2021).** Production of activated carbon from sawdust and its efficiency in the treatment of sewage water. *Heliyon*, 7(1), e05960. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05960>

**Parker Laura. (2022).** Los microplásticos ya están en nuestros cuerpos. ¿Cuánto nos dañan? National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2022/04/los-microplasticos-y-a-estan-en-nuestros-cuerpos-cuanto-nos-danan>

**Pendergraph, D. P., Ranieri, J., Ermatinger, L., Baumann, A., Metcalf, A. L., DeLuca, T. H., & Church, M. J. (2021).** Differentiating sources of fecal contamination to wilderness waters using droplet digital PCR and fecal indicator bacteria methods. *Wilderness & Environmental Medicine*, 32(3), 332–339.

**Peng, G., Yaoqin, W., Changmei, S., Chunnuan, J., Ying, Z., Rongjun, Q., & Ying, W. (2022).** Preparation and properties of PVC-based ultrafiltration membrane reinforced by in-situ synthesized p-aramid nanoparticles. *Journal of Membrane Science*, 642(119993), 119993. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119993>

**Pérez López, E., & Rojas Hernández, A. (2016).** VALIDACIÓN DE UN MÉTODO PARA CUANTIFICACIÓN DE ACETAMINOFÉN EN TABLETAS DE 500 mg POR ESPECTROFOTOMETRÍA ULTRAVIOLETA PARA LA PRUEBA DE UNIFORMIDAD DE CONTENIDO. *InterSedes*, 17(35). <https://doi.org/10.15517/isucr.v17i35.25563>

**Pollap, A., Baran, K., Kuszewska, N., & Kochana, J. (2020).** Electrochemical sensing of ciprofloxacin and paracetamol in environmental water using titanium sol based sensor. *Journal of Electroanalytical Chemistry (Lausanne, Switzerland)*, 878(114574), 114574.

**Ponce Álvarez, S. (2015).** Degradación fotocatalítica de paracetamol en aguas, utilizando nanopartículas de TiO<sub>2</sub> soportado sobre esferas de vidrio. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/3271>

**Rajca, M. (2012).** The role of microfiltration and ultrafiltration in hybrid treatment systems for NOM removal from water. *Procedia Engineering*, 44, 1527–1529. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.854>

**Ren, Y., Ma, Y., Min, G., Zhang, W., Lv, L., & Zhang, W. (2021).** A mini review of multifunctional ultrafiltration membranes for wastewater decontamination: Additional functions of adsorption and catalytic oxidation. *The Science of the Total Environment*, 762(143083), 143083. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143083>

**Sarkar, D. J., Das Sarkar, S., Das, B. K., Praharaj, J. K., Mahajan, D. K., Purokait, B., Mohanty, T. R., Mohanty, D., Gogoi, P., Kumar, S., V., Behera, B. K., Manna, R. K., & Samanta, S. (2021).** Microplastics removal efficiency of drinking water treatment plant with pulse clarifier. *Journal of Hazardous Materials*, 413(125347), 125347. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125347>

**Schumann, P., Ordóñez Andrade, J. A., Jekel, M., & Ruhl, A. S. (2020).** Packing granular activated carbon into a submerged gravity-driven flat sheet membrane module for decentralized water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 38(101517), 101517. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101517>

**Siddiqui, A., Lehmann, S., Haaksman, V., Ogier, J., Schellenberg, C., van Loosdrecht, M. C. M., Kruithof, J. C., & Vrouwenvelder, J. S. (2017).** Porosity of spacer-filled channels in spiral-wound membrane systems: Quantification methods and impact on hydraulic characterization. *Water Research*, 119, 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.034>

**Singh, R., Volli, V., Lohani, L., & Purkait, M. K. (2021).** Polymeric ultrafiltration membranes modified with fly ash based carbon nanotubes for thermal stability and

protein separation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4(100155), 100155. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100155>

**Sotto, A. (2008).** Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-29-Representacion-de-un-modulo-de-membrana-en-esprial\\_fig2\\_48989441](https://www.researchgate.net/figure/Figura-29-Representacion-de-un-modulo-de-membrana-en-esprial_fig2_48989441)

**Walker, D. B., Baumgartner, D. J., Gerba, C. P., & Fitzsimmons, K. (2019).** Surface Water Pollution. En *Environmental and Pollution Science* (pp. 261–292). Elsevier.

**Wright, N. C., & Winter, A. G., V. (2019).** Design of spiral-wound electro dialysis modules. *Desalination*, 458, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.01.010>

**Xiao, F., Bedane, A. H., Mallula, S., Sasi, P. C., Alinezhad, A., Soli, D., Hagen, Z. M., & Mann, M. D. (2020).** Production of granular activated carbon by thermal air oxidation of biomass charcoal/biochar for water treatment in rural communities: A mechanistic investigation. *Chemical Engineering Journal Advances*, 4(100035), 100035. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100035>

**Xu, G., Wang, T., Wei, Y., Zhang, Y., & Chen, J. (2021).** Fecal coliform distribution and health risk assessment in surface water in an urban-intensive catchment. *Journal of Hydrology*, 127204, 127204.

**Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K.-H., Kwon, E. E., & Tsang, Y. F. (2017).** Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *The Science of the total environment*, 596–597, 303–320.

**Yu, Y., Choi, Y. H., Choi, J., Choi, S., & Maeng, S. K. (2018).** Multi-barrier approach for removing organic micropollutants using mobile water treatment systems. *The Science of the Total Environment*, 639, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.079>

**Zhang, G., Zhou, M., Xu, Z., Jiang, C., Shen, C., & Meng, Q. (2019).** Guanidyl-functionalized graphene/polysulfone mixed matrix ultrafiltration membrane with superior permselective, antifouling and antibacterial properties for water treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 540, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.050>

**Zhang, W., Liu, Y., Li, Z., Xu, S., Zhang, J., Hettinga, K., & Zhou, P. (2021).** Effects of microfiltration combined with ultrasonication on shelf life and bioactive protein of skim milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77(105668), 105668. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105668>

**Zhang, X., Chen, L., & Shen, Z. (2021).** Impacts of rapid urbanization on characteristics, sources and variation of fecal coliform at watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 286(112195), 112195.

**Zuccato, E., Calamari, D., Natangelo, M., & Fanelli, R. (2000).** Presence of therapeutic drugs in the environment. *Lancet*, 355(9217), 1789–1790.

## 9. ANEXO

El tratamiento de agua se hizo solo por duplicado, ya que los nanotubos de carbono tienen un costo alto y no se tenía acceso a más material, la primer corrida de los trenes de tratamiento fue con los contaminantes de coliformes fecales, paracetamol y huevos de helminto, luego se cambió el último contaminante por no tener acceso a más muestras con huevos de helminto, por lo que se evaluó el contaminante y posteriormente se escogieron los microplásticos como contaminante de la segunda corrida de los trenes de tratamiento.

Los resultados que se presentan a continuación son los de la primera corrida de los trenes de tratamiento de agua.

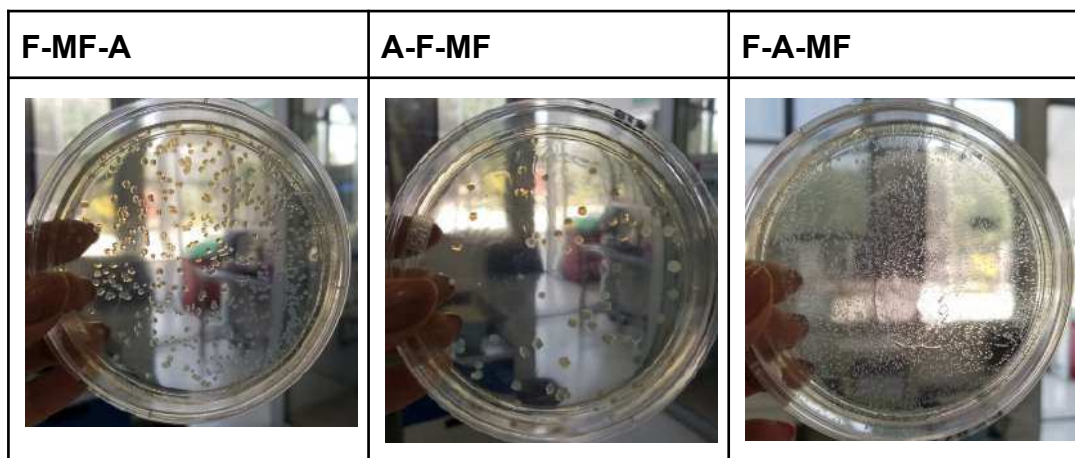
Los tiempos de duración del tratamiento de las distintas configuraciones se presentan en el Cuadro 11, el mejor tiempo lo tuvo la configuración 3.

Cuadro 11. Duración del tratamiento de agua de las distintas configuraciones.

<b>F-MF-A</b>	<b>A-F-MF</b>	<b>F-A-MF</b>
2:07	2:25	2:00

Después de que terminara el tratamiento de agua se tomó una muestra de cada membrana con un hisopo estéril y se inoculó en distintas cajas petri, los resultados se observan en el Cuadro 12, donde se muestra que el mejor resultado lo obtuvo el tren de tratamiento con la configuración 2.

Cuadro 12. Comparación de las muestras de las membranas de las diferentes configuraciones.



Para analizar la concentración final de coliformes fecales se inoculó en cajas petri muestras del agua tratada y se hizo el conteo de colonias de una concentración

inicial de  $6.87 \times 10^6$  UFC de *E. coli* se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en el Cuadro 13, donde se obtuvo mejor reducción del contaminante en la configuración 2.

Cuadro 13. Comparación de las concentraciones expresadas en UFC/ L finales de coliformes fecales del tratamiento de agua de las distintas configuraciones.

<b>F-MF-A</b>	<b>A-F-MF</b>	<b>F-A-MF</b>
73.8x10 <sup>4</sup>	28.5x10 <sup>4</sup>	86.8x10 <sup>4</sup>

Para los resultados de reducción de paracetamol no se tuvo ningún cambio en la concentración inicial contra la final, esto se debe a que la activación del carbón no se hizo correctamente ya que no se usó la concentración correcta de los químicos.

Ésto nos lleva a la comparación final de los resultados obtenidos en el Cuadro 14.

Tomando en cuenta los resultados de Coliformes fecales, del ensuciamiento de la membrana y el tiempo del tratamiento como se ve en el Cuadro 14 podemos considerar que el mejor tren de tratamiento de agua es la Configuración 2 (F-MF-A).

Cuadro 14. Comparación de todos los resultados.

	<b>CF</b>	<b>Membrana</b>	<b>Tiempo</b>
<b>(F-MF-A)</b>	2°	2°	2°
<b>(A-F-MF)</b>	1°	1°	3°
<b>(F-A-MF)</b>	3°	3°	1°

Similar a los resultados discutidos sobre la segunda corrida de los tratamientos de agua, si dejamos fuera los resultados de reducción de microplásticos y de paracetamol en ambas corridas tenemos que el mejor tratamiento es la configuración de Adsorción- Filtración- Microfiltración.

Sin embargo, para cumplir con los objetivos y con la hipótesis tenemos que considerar la reducción de todos los contaminantes, por lo que podemos ver de los resultados de la segunda corrida de las distintas configuraciones de tratamiento de agua contaminada, la mejor configuración es la 1.