

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS AMBIENTALES

ESTUDIO DE CASO: UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS DE CAPA FINA EN LA
PURIFICACIÓN DE AGUA DE LA PLANTA DE FILTRACIÓN BETANCES EN
CABO ROJO, PUERTO RICO

ZULLYMAR VÉLEZ LLANTÍN

2024

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS AMBIENTALES

Tesis presentada y aprobada para completar los requisitos para el grado de Maestría en
Ciencias en Ciencias Ambientales

ESTUDIO DE CASO: UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS DE CAPA FINA EN LA
PURIFICACIÓN DE AGUA DE LA PLANTA DE FILTRACIÓN BETANCES EN
CABO ROJO, PUERTO RICO

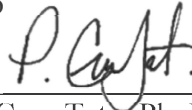
ZULLYMAR VÉLEZ LLANTÍN

Diciembre 2024

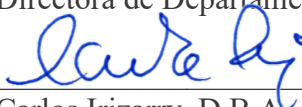
Miembros del Comité de Tesis:

 _____ Angela González Mederos, Ph. D. Directora	<u>10 de diciembre 2024</u> Fecha
--	--------------------------------------

 _____ Eduardo Nicolau, Ph. D. Miembro	<u>10 diciembre 2024</u> Fecha
--	-----------------------------------

 _____ Perla E. Cruz Tato, Ph. D. Miembro	<u>10 diciembre 2024</u> Fecha
---	-----------------------------------

 _____ Lina Llanos, Ed. D. Directora de Departamento de Ciencias y Tecnología	<u>10 de diciembre 2024</u> Fecha
---	--------------------------------------

 _____ Carlos Irizarry, D.B.A. Director Escuela de Estudios Graduados e Investigación	<u>18 de diciembre de 2024</u> Fecha
---	---

Agradecimientos

Primero agradezco a Dios porque sin él, no lo hubiese logrado. A mi hija, que ha sido mi mayor fuerza, motor y motivación para no rendirme. A mi comité de tesis (Dr. Eduardo Nicolau Dra. Ángela González y Dra. Perla E. Cruz) por brindarme la oportunidad de ser parte de mi comité, dirigirme, orientarme, ayudarme y encaminarme a realizar este trabajo. Al Dr. Eduardo Nicolau por donar sus membranas y permitirme utilizar equipo de su laboratorio de la Universidad de Puerto Rico, recinto de Río Piedras. A Dra. Perla por explicarme y orientarme acerca del procedimiento de corrida de membrana y por donar de su tiempo para realizar las corridas de membrana de las muestras de agua cruda y agua potable durante todo el tiempo que realizamos el experimento. Al grupo de estudiantes de la Universidad de Puerto Rico recinto de Río Piedras que trabajaron en la fabricación de las membranas donadas. A Andreica Maldonado por creer en mí, por presentarme y contactarme con el Dr. Nicolau para que esta investigación fuera posible. A mi mamá, mi papá, mi familia, pareja y amigos que creyeron en mí, me ayudaron, apoyaron y animaron a lograrlo. A la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados por su apoyo en este estudio y a todo el personal de la (AAA) que me ayudó a realizar este trabajo. A la Universidad Interamericana de Puerto Rico, Recinto de San German por brindarme la oportunidad de educarme aún más para evolucionar como profesional y ser humano. Por último y no menos importante, quiero agradecerme a mí misma, porque muchas veces dudé de mí. Porque anhelaba completar esta meta y sueño, pero en muchas ocasiones no me sentía capaz, ni creía en mí. Porque fue difícil y complicado, pero continué luchando para lograrlo. Por eso hoy, a pesar de los obstáculos y de las circunstancias incontrolables enfrentadas, me siento agradecida y orgullosa de mí.

Tabla de Contenido

Resumen.....	6
Introducción	8
Objetivos	11
Revisión de literatura	12
I. Contaminación del agua	12
Control de contaminantes en el agua en los Estados Unidos	13
Control de contaminantes del agua potable en Estados Unidos	13
Regulación de contaminantes en el agua potable de los Estados Unidos	14
La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico.....	21
Clasificación de los sistemas de agua potable en Puerto Rico	21
Tratamiento de agua potable	23
II. Membranas en tratamiento de agua	26
Osmosis del agua	28
Soluciones envueltas en los procesos osmóticos de membrana en tratamiento de agua	29
Procesos osmóticos de membrana en tratamiento de agua	30
Problemas que afectan las membranas en tratamiento de agua	34
Procesos de membranas impulsados por presión en filtración de agua por membrana	36
Módulos de membrana en tratamiento de agua	38
Tratamiento de agua potable con membrana	40
Plantas de tratamiento de agua potable de membrana en Puerto Rico	40

Membrana compuesta de película o capa fina	45
Osmosis directa utilizando membrana TFC	47
Utilización de membranas en purificación de agua	49
Planta de tratamiento de agua potable donde se muestreó en este estudio	54
Pruebas de calidad de agua realizadas en la planta de filtración de donde se obtuvo el agua cruda y agua potable para este estudio	56
Parámetros de calidad de agua medidos en el estudio	57
Materiales y métodos	61
Recolección de muestras	62
Almacenaje y transporte de muestras antes de la filtración por membrana	66
Almacenaje y transporte de muestras después de la filtración por membrana	67
Procedimiento de filtración por membrana	69
Análisis físico-químicos a muestras y controles	76
Resultados	88
Análisis de resultados	101
Conclusiones	113
Recomendaciones	116
Bibliografía	117
Apéndices	126

RESUMEN

El agua es indispensable en la supervivencia de los organismos y menos del 1% está disponible para uso humano. La escasez y la contaminación del agua son problemas que actualmente el mundo enfrenta. La Organización Mundial de la Salud indica que esto puede empeorar debido al aumento en población y a el cambio climático. El proveer agua segura es importante y las investigaciones en esta área han resultado en distintos procesos y tecnologías para el tratamiento del agua. En el presente se utilizan gran variedad de estos, para eliminar contaminantes en el agua potable y ofrecer agua de calidad para consumo humano. El uso de membranas en el tratamiento de agua es considerado una tecnología innovadora por la cantidad de beneficios que ofrece. En la actualidad, las membranas compuestas de capa o película fina con osmosis directa son muy utilizadas para la purificación de agua por los beneficios que ofrecen. Estas membranas se caracterizan por ser selectivas, tener alta permeabilidad, ser menos propensas al ensuciamiento de la membrana y consumir poca energía (debido a que el proceso es impulsado naturalmente por la diferencia en presión osmótica y no por una fuerza externa hidráulica), convirtiéndola en una tecnología más costo efectiva en comparación con otros. El propósito de este estudio fue evaluar la eficiencia de una membrana compuesta de película fina para la purificación de agua para tratamiento de agua potable utilizando agua cruda y agua potable de la planta de filtración PF Betances, municipio de Cabo Rojo, Puerto Rico. Para esto, se colectó agua cruda y agua tratada de la planta de tratamiento y se le realizaron distintos análisis físico-químicos (alcalinidad, amoníaco, cloro libre, cloro total, pH y turbidez), para luego filtrarlas por una membrana compuesta de capa fina por osmosis directa donde actuaron como soluciones alimentadoras en el proceso de filtración por membrana. Los parámetros fueron medidos nuevamente después de realizar la filtración

por membrana a la solución extractora diluida y los resultados fueron comparados con las mediciones previas a la filtración. Estos parámetros físico-químicos fueron utilizados como indicadores de calidad de agua en las muestras. La filtración por membrana en este estudio demostró remoción de turbidez de agua cruda (99%), remoción de cloro libre en agua potable (98%), cloro total en agua potable (98%) y alcalinidad en agua cruda (86%) y agua potable (83%) por lo que la membrana puede ser considerada en el tratamiento de agua dependiendo el uso a implementar. La membrana también mostró rasgos de resistencia al cloro residual, y no afectó el pH de las muestras. Los resultados obtenidos en la muestra de agua cruda demostraron que su uso para tratamiento de agua potable es viable.

INTRODUCCIÓN

El agua es crucial en la vida de los seres vivos y el funcionamiento de los ecosistemas (EPA, 2022). Este líquido preciado es muy abundante en la Tierra, pero solo el 1% del agua dulce puede utilizarse para el consumo humano (EPA, 2022). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2020 más de 2000 millones de personas vivían en países con escasez de agua e indican que esto puede empeorar debido al cambio climático y el aumento en la población (OMS, 2022). La contaminación del agua es un problema común alrededor del mundo (Sharma & Bhattacharya, 2017) que puede ocasionar efectos adversos en los seres vivos y en el uso del agua potable (EPA, 2022).

La creación e implementación de leyes han ayudado a obtener mayor control de contaminantes en el agua. Para lograr el control de contaminantes en el agua en los Estados Unidos y sus territorios, el gobierno ha creado e implementado diferentes leyes que regulan contaminantes y que requieren diferentes procesos y tecnologías (EPA, 2023). El tratamiento de agua potable utiliza diferentes procesos y tecnologías para el control de contaminantes en el agua y tiene como propósito el proteger la salud pública y las fuentes de abasto utilizadas en el tratamiento de agua potable a través de su regulación (EPA, 2003). Brindar agua segura es un reto, pero gracias a investigaciones en esta área han surgido mejores procesos y tecnologías (Sharma & Bhattacharya, 2017) que han ayudado a controlar, a eliminar contaminantes y a ofrecer agua de calidad para el consumo humano.

La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) (regulada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en Inglés: “Environmental Protection Agency”) y el Departamento de Salud de Puerto Rico (AAA,

Sin fecha)), es responsable del tratamiento de agua potable del 97% de la población de Puerto Rico (AAA, Sin fecha). Esta agencia monitorea, establece medidas en el tratamiento, en los sistemas, en el control de contaminantes y en calidad de agua potable para asegurar su cumplimiento y que la misma sea segura para el consumo humano (AAA, Sin fecha). Aunque la AAA supe agua potable al 97% de la población puertorriqueña, hay un 3% aproximado de la población que tienen sus propios sistemas de tratamiento de agua potable mayormente porque se encuentran en comunidades rurales y/o remotas (EPA, 2018). Estos sistemas confrontan problemas de cumplimiento con las regulaciones federales, estatales y a su vez, problemas para ofrecer agua segura a sus comunidades (EPA, 2018).

Actualmente se utilizan diferentes procesos en el tratamiento del agua para eliminar contaminantes y convertirla en agua segura para el consumo humano (agua potable) (EPA, 2003). Los tratamientos más utilizados para agua potable son: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (EPA, 2003). Las membranas en el tratamiento de agua son consideradas una tecnología innovadora donde se utiliza una membrana semipermeable para remover impurezas del agua (Sharma & Bhattacharya, 2017). La membrana compuesta de capa fina (TFC, por sus siglas en inglés: “Thin Film Composite”), se caracteriza por ser selectiva, resistente al ensuciamiento de la membrana (membrana tapada), se puede manejar fácilmente (Madhura, et al., 2017), tiene buena permeabilidad de agua y rechazo de sal (Cruz Tato, et al., 2017) y ha demostrado ser eficiente en la purificación de agua y remoción de contaminantes (El-Zahhar, Alghamdi, Alshahrani, Awwad, & Idris, 2022). En el campo de la osmosis directa, las membranas TFC son preferidas en aplicaciones reales (Cruz Tato, et al., 2017) y son ampliamente usadas en

desalinización (proceso convencional en remover sales de agua salina), lo que puede ser una solución a la escasez de agua potable (Kolangare, Isloor, Inamuddin, Asiri, & Ismail, 2019). Entre las ventajas que la osmosis directa ofrece figuran la disminución del ensuciamiento de la membrana, alto rechazo de contaminantes, bajo costo (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017), alto flujo de agua con el menor consumo de energía (Cruz Tato, et al., 2017), selectividad y es más costo efectivo (Cruz Tato, Rivera Fuentes, Flynn, & Nicolau, 2019).

En el 2017, en Puerto Rico se realizó un estudio con membrana TFC fabricada y modificada, donde se evaluó la eficiencia de la filtración por membrana con osmosis directa en agua residual de una planta de tratamiento de agua usada en Puerto Rico y se obtuvo resultados favorables en la eficiencia de la membrana (Cruz Tato, et al., 2017).

Actualmente la contaminación y escasez del agua potable sigue siendo una situación que se atiende día a día donde se han tenido que adoptar diferentes procesos y tecnologías para optimizar el tratamiento de agua y aunque el agua potable cuenta con regulaciones, continúa presentando retos, es por esto que en esta investigación se evaluó la eficiencia de la membrana TFC con osmosis directa en la purificación de agua (cruda y potable) de una planta de tratamiento de agua potable de Puerto Rico. A pesar de que este estudio fue realizado con el mismo proceso osmótico (osmosis directa) de filtración por membrana y el mismo tipo de membrana TFC (fabricadas y donadas) sin modificar utilizada en el estudio anterior mencionado (Cruz Tato, et al., 2017) , este es el primer estudio realizado en Puerto Rico para evaluar la eficiencia de membrana TFC con osmosis directa para la purificación de agua de una planta de tratamiento de agua potable.

OBJETIVOS

El propósito de este estudio fue evaluar la eficiencia de la membrana compuesta de capa fina por osmosis directa en agua cruda (agua no tratada) y agua potable (agua tratada) de una planta de filtración de Puerto Rico a través de mediciones y cumplimiento de parámetros físico-químicos que funcionan como indicadores la calidad de agua regularmente en las plantas de tratamiento de agua potable en Puerto Rico.

Los objetivos del estudio fueron:

- Determinar cambios en los parámetros físico-químicos de agua filtrada (potable) y agua no filtrada (cruda) antes y después de la filtración con membrana.
- Evaluar la eficiencia de la membrana compuesta de capa fina para lograr el cumplimiento de parámetros físico-químicos de calidad de agua potable en muestras de agua cruda (no tratada) y agua potable (tratada).
- Comparar los resultados obtenidos de la filtración por membrana del agua cruda (no tratada) y agua potable (tratada).

REVISIÓN DE LITERATURA

El agua es muy importante en la vida de los organismos y en el funcionamiento de los ecosistemas (EPA, 2022). Este líquido preciado es muy abundante en la Tierra, pero solo el 1% del agua dulce puede utilizarse para el consumo humano (EPA, 2022). Algunos ejemplos del uso que los humanos le damos al agua dulce son: la agricultura, las industrias, la recreación y su consumo (Sharma & Bhattacharya, 2017). La Organización Mundial de la Salud (OMS) indicó que en el 2020 más de 2,000 millones de personas vivían en países con escasez de agua y que esto empeoraría por el aumento poblacional y el cambio climático (OMS, 2022). Además de la escasez de agua, la contaminación en el agua también es un problema que limita la disponibilidad segura para consumo humano.

Contaminación del agua

La contaminación en el agua es un problema común en el mundo que puede causar efectos adversos en los seres vivos, en los ecosistemas y en el uso de agua potable (EPA, 2022). Esta, puede ser de manera natural (presente naturalmente en el medio ambiente por: microorganismos, radionucleidos (rocas subterráneas), compuestos de nitrógeno (suelo), metales pesados (rocas con plomo), flúor, selenio, cadmio, arsénico y cromo)) o por actividades humanas y de animales (causadas por animales e humanos por: desechos de animales y humanos, tanques sépticos, granjas, metales pesados (construcciones mineras), fertilizantes, pesticidas, desechos de plantas industriales, fugas en tanques subterráneos, vertederos, basureros, desechos en residencias, tuberías (plomo y cobre) y compuestos químicos en el tratamiento de agua) (EPA, 2003).

La contaminación en el agua puede evitarse tomando amplias medidas que, gracias a las leyes e investigaciones hechas a lo largo del tiempo, han traído procesos y tecnologías novedosas (Sharma & Bhattacharya, 2017). Esto ha sido muy importante en el tratamiento de agua potable para lograr ofrecer agua de calidad y de fácil acceso para las comunidades ya que disminuye enfermedades asociadas a el consumo de agua contaminada (OMS, 2022).

Control de contaminantes en el agua en los Estados Unidos

La Ley de Agua Limpia (CWA, por sus siglas en inglés: “Clean Water Act”), regula las descargas de contaminantes y los estándares de calidad en las aguas superficiales que pertenecen a los Estados Unidos (EPA, 2022). Esta, fue publicada en el 1948 como Acta de Control de Contaminantes en el Agua, pero en el 1972 fue enmendada a lo que hoy conocemos como la Ley de Agua Limpia (EPA, 2022) (EPA, 2023). El Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (NPDES, por sus siglas en inglés: “National Pollutant Discharge Elimination System”) es un permiso que regula la descarga de contaminantes puntuales en aguas navegables de Estados Unidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2022).

Control de contaminantes del agua potable en Estados Unidos

La Ley de Agua Potable Segura (SDWA, por sus siglas en inglés: “Safe Drinking Water Act”) fue creada para proteger la calidad de agua potable en los Estados Unidos (EPA, 2021). Fue aprobada por el congreso de los Estados Unidos en 1974, y enmendada en el 1986 y 1996 (EPA, 2022). Esta ley vela que los suministros públicos (que le sirvan a 25 personas mínimo o que tenga 15 conexiones de servicio mínimo, por 60 días al año) y

el agua potable pública de los territorios de los Estados Unidos, sean seguros para el consumo humano (EPA, 2003) (EPA, 2022). También implementa métodos en el tratamiento del agua potable que ayuden a remover contaminantes y a la vez optimicen el tratamiento (EPA, 2022). La EPA es la agencia responsable de asegurar el cumplimiento de esta ley (EPA, 2022) y a través de ella exige el cumplimiento de estándares de contaminantes en los sistemas públicos de agua potable e incluye el realizar, monitorear, reportar y regular los mismos (EPA, 2021). En la Ley de Agua Potable Segura, la EPA establece reglamentos para controlar contaminantes y estándares para asegurar la calidad del agua potable (EPA, 2022).

Regulación de contaminantes en el agua potable de Estados Unidos

La Ley de Agua Potable Segura clasifica a los contaminantes en primarios y secundarios. Los contaminantes primarios (microbiológicos, compuestos químicos y radiológicos) son los que pueden causar efecto adverso en la salud pública mientras que los contaminantes secundarios son compuestos que pueden causar efectos en la estética del agua potable (olor, color, sabor) y establece al estado como el primer responsable en el cumplimiento de ellos (EPA, 2022).

El Reglamento Nacional Primario de Agua Potable (NPDWR, por sus siglas en inglés: “National Primary Drinking Water Regulations”) establece estándares para contaminantes clasificados como primarios en el agua potable (microorganismos, desinfectantes, subproductos de desinfección, químicos orgánicos, químicos inorgánicos y radionucleidos) y técnicas de tratamiento en los sistemas públicos de agua potable (EPA, 2022). Este reglamento monitorea diferentes parámetros que deben cumplirse mediante

estándares fijos establecidos como: nivel máximo de contaminante (MCL, por sus siglas en inglés: “Maximum Contaminant Level”) en agua potable permitido (que es obligatorio), meta de nivel máximo de contaminante (MCLG, por sus siglas en inglés: “Maximum Contaminant Level Goal”) (no se conocen o esperan riesgos en la salud), nivel máximo de desinfectante residual (MRDL, por su siglas en inglés: “Maximum Residual Disinfectant Level”) en agua potable permitido, meta del nivel máximo de desinfectante residual (MRDLG, por sus siglas en inglés: “Maximum Residual Disinfectant Level Goal”) en agua potable y técnica de tratamiento (TT) (proceso requerido para disminuir la cantidad de un contaminante en agua potable) (EPA, 2003) (EPA, 2022).

El NPDWR es un compendio de distintas reglas que establecen estos estándares. A continuación, se enumerarán los tipos de contaminantes regulados con las reglas que los rigen:

1. microorganismos (Reglas de tratamiento de aguas superficiales, Regla de agua subterránea, Regla de coliformes totales y Regla revisada de coliformes totales),
2. subproductos de desinfección y desinfectantes (Regla de desinfectantes y subproductos de la desinfección de etapa 1 y 2),
3. compuestos químicos orgánicos y compuestos químicos inorgánicos (Regla de contaminantes químicos) y
4. radionucleidos (Regla de radionucleidos) (EPA, 2022).

La EPA ha establecido estándares de agua potable a más de 90 contaminantes (EPA, 2022). A continuación, se ofrecerá información más específica de cada una de ellas.

Microorganismos

Las Reglas de Tratamiento de Agua Superficial (SWTR, por sus siglas en inglés: Surface Water Treatment Rules”) y la Regla de Tratamiento de Agua Subterránea (GWR, por sus siglas en inglés: “Groundwater Treatment Rule”) fueron establecidas para disminuir enfermedades ocasionadas por microorganismos patógenos en agua de los sistemas públicos de agua potable (EPA, 2022) (EPA, 2022).

Las SWTRs aplica a sistemas que utilizan agua superficial o agua subterránea (directamente influenciada por agua superficial) e incorpora distintas reglas como:

- Regla de Tratamiento de Agua Superficial que se enfoca en reducir microorganismos patógenos en el agua potable como lo son: *Legionella*, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium*, protegen de contaminantes que se pueden formar durante el tratamiento y requiere que los sistemas públicos de agua provenientes de aguas superficiales se filtren y desinfecten para aumentar la calidad del agua potable, aunque algunos sistemas solo requieren desinfección de cumplir con criterios en la calidad de agua (EPA, 2022), establece MCLG para virus, bacterias y *Giardia lamblia* e incluye requisitos de TT para sistemas filtrados y no filtrados;
- Regla Interina Mejorada de Tratamiento de Agua Superficial (IESWTR, por sus siglas en inglés: “Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule”) aplica a sistemas públicos de agua que sirvan a $\geq 10,000$ personas, establece MCLG de cero y 2-log de remoción para *Cryptosporidium*, en sistemas que utilicen filtración, programas de protección de cuencas en sistemas que no requieran filtración y en ocasiones requiere otros procesos en filtración de algunos sistemas, etc.;
- Regla de Reciclaje de Retrolavado de Filtros (FBRR, por sus siglas en inglés: “Filter Backwash Recycling Rule”) aplica a sistemas públicos de agua que utilizan

tratamiento convencional o filtración directa de agua superficiales o agua subterránea que este influenciada por agua superficial, requiere que los sistemas públicos de agua revisen las prácticas de reciclaje de agua de retrolavado para que no comprometan el control microbiano y que el agua reciclada de retrolavado pase por tratamiento convencional o filtración directa;

- Regla Mejorada de Tratamiento de Aguas Superficiales a Largo Plazo 1 (LT1ESWTR, por sus siglas en inglés: “Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule”) requiere lo mismo que la Regla Interina Mejorada de Tratamiento de Agua Superficial pero a sistemas públicos de agua que sirvan a <10,000 personas, y
- Regla Mejorada de Tratamiento de Aguas Superficiales a Largo Plazo 2 (LT2ESWTR, por sus siglas en inglés: “Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule”) que se enfoca en requerimientos adicionales de tratamiento para *Cryptosporidium* en sistemas que tengan mayor riesgo, proporciona se garantice la protección microbiana de sistemas y a su vez toman medidas para reducir formación de los subproductos de desinfección (EPA, 2022). La regulación del protozooario *Cryptosporidium* es de gran relevancia en el agua potable debido a que el mismo es resistente al cloro y otros desinfectantes (EPA, 2022).

La Regla de Tratamiento de Agua Subterránea aplica a sistemas de agua potable públicos que utilicen agua subterránea como fuente para agua potable y cualquier sistema que añada agua subterránea al sistema de distribución sin tratamiento, debido a que pueden ser susceptibles a contaminación fecal y una de las medidas que requiere es el monitoreo

continuo en el tratamiento de agua potable para asegurar la inactivación o remoción de los virus al %99.99 (4-log) (EPA, 2022).

La Regla de Coliformes Totales y Regla Revisada de Coliformes Totales aseguran la calidad de agua del sistema de distribución y monitorean la presencia de contaminantes microbianos estableciendo MCLG y MCL de coliformes totales en agua potable (EPA, 2022). Los coliformes totales son indicadores de presencia de patógenos en agua potable y se miden para corroborar la calidad del agua (EPA, 2022). La EPA establece un MCLG de cero para coliformes totales en agua potable (debido a que ha habido brotes de enfermedades transmitidas por agua con su presencia) y establece MCLG y MCL de cero para *Escherichia coli* (*E. coli*) para proteger el agua de la contaminación fecal (EPA, 2022).

Desinfectantes y Subproductos de desinfección

Las reglas para desinfectantes y subproductos de desinfección (DBPRs, por sus siglas en inglés: “Disinfectant and Disinfection Byproducts Rules”) etapa 1 y 2, brindan protección contra subproductos de desinfección, ya que estos pueden causar cáncer y efectos adversos en la reproducción de los animales y humanos (EPA, 2010) (EPA, 2022). La etapa 1 de DBPR disminuye la exposición de tres desinfectantes (cloro, cloraminas y dióxido de cloro), de subproductos de desinfección en agua potable y aplica a sistemas de agua que usen cualquiera de estos tres desinfectantes en el tratamiento de agua potable, a excepción de la luz ultravioleta y sistemas de agua transitorios no comunitarios que utilicen dióxido de cloro (EPA, 2001) (EPA, 2022). La etapa 2 de DBPR aplica a los sistemas públicos de agua más vulnerables por los subproductos de desinfección (para tomar mayores medidas a lo exigido regularmente) (EPA, 2005). En ella, se incluye protección a

subproductos de desinfección de dos grupos: trihalometanos totales (TTHM (cloroformo, bromoformo, bromodiclorometano y dibromoclorometano)) y cinco ácidos haloacéticos (HAA5 (monocloro-, dicloro-, tricloro-, monobromo- y dibromo-)), para reducir los riesgos de salud en agua potable monitoreando el cumplimiento de estos (EPA, 2005) (EPA, 2022). Los subproductos de desinfección (trihalometanos (THM), ácidos haloacéticos (HAA), clorito y bromato) se forman cuando los desinfectantes utilizados en el tratamiento de agua se combinan con materiales naturales en el agua y reaccionan entre ellos (EPA, 2022).

Compuestos Químicos Orgánicos e Inorgánicos

La Regla de Contaminantes Químicos o regla de fases (II-V) regula más de 65 contaminantes clasificados en tres grupos: químicos inorgánicos (como arsénico, nitrato y nitrito), químicos orgánicos volátiles y químicos orgánicos sintéticos (EPA, 2022). Esta regla requiere MCLGs, MCLs, monitoreo y tecnologías disponibles para remover esos contaminantes logrando evitar riesgos en la salud como cáncer, daño de órganos, síndrome de bebé azul, desorden del sistema circulatorio, nervioso y reproductivo (EPA, 2022).

Por último en el Reglamento Nacional Primario de Agua Potable, la Regla de Radionucleidos vela que los sistemas de agua cumplan con los MCL de los radionucleidos en agua potable como por ejemplo uranio que su MCL es 30µg/L (EPA, 2022).

El Reglamento Nacional Secundario de Agua Potable (NSDWR, por sus siglas en inglés “National Secondary Drinking Water Regulations”) establece estándares de calidad de agua mediante los niveles de contaminantes máximos secundarios (SMCL, por sus siglas en inglés: “Secondary Maximum Contaminant Level”) para 15 contaminantes clasificados como secundarios que no son obligatorios porque no se consideran

perjudiciales para la salud (EPA, 2022). Aunque esto sea así, la presencia de estos contaminantes en el agua puede ocasionar que algunas personas no tomen agua potable (EPA, 2022).

La EPA clasifica los efectos ocasionados por los contaminantes secundarios en: estéticos (olor, sabor no deseado), cosméticos (apariencia, no le hacen daño al cuerpo, pero no son deseados) y técnicos (producen daños en los equipos de tratamiento o reducen la efectividad del tratamiento) que pueden ser indicadores de la calidad en el agua (EPA, 2022). El tratamiento convencional remueve muchos de los contaminantes secundarios, por ejemplo: la coagulación, floculación y filtración (remueven hierro, manganeso, y zinc), la aeración (remueve olor, hierro y manganeso) y el carbón activado granular (remueve olor, color y espumosis) (EPA, 2022).

En Puerto Rico, el agua potable también es regulada por las leyes federales como lo es la Ley de Agua Potable Segura por ser territorio de los Estados Unidos (EPA, 2022). La EPA y el Departamento de Salud de Puerto Rico (DSPR) son las agencias encargadas de fiscalizar que el agua potable cumpla con las leyes, reglamentaciones y estándares establecidos a nivel federal (Ley de Agua Potable Segura) y estatal (Ley para proteger la calidad del agua potable en Puerto Rico) (AAA, Sin fecha).

Alrededor del mundo, diferentes organizaciones y agencias se encargan de velar por el cumplimiento de leyes que garanticen la calidad del agua y aseguren la salud pública (AAA, Sin fecha) (EPA, 2022) (OMS, 2022).

La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico

La Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico (AAA) fue creada el 1 de mayo de 1945 por la ley 40 (Ley de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico) para darle a la población de Puerto Rico servicios de agua potable y alcantarillado de alta calidad al menor costo posible (AAA, Sin fecha) (AAA, Sin fecha). Esta agencia gubernamental ofrece servicio de agua potable (97%) y alcantarillado (60%) a la mayoría de los residentes de Puerto Rico (EPA, 2018).

Clasificación de los sistemas de agua potable en Puerto Rico

Los sistemas de tratamiento de agua potable en Puerto Rico se clasifican en AAA (PRASA, por sus siglas en inglés: “Puerto Rico Aqueduct and Sewer Authority”) y No-AAA (non-PRASA, por sus siglas en inglés). En la actualidad el 97% de la población en Puerto Rico se abastece de sistemas AAA y aproximadamente el 3% se abastece de sistemas No-AAA (AAA, Sin fecha).

a. Sistemas AAA (PRASA por sus siglas en inglés)

La AAA cuenta con 113 plantas de filtración y 249 pozos (AAA, Sin fecha) que brindan agua potable a sus clientes en Puerto Rico. Sus fuentes de abasto son ríos, lagos (en plantas de filtración) y agua subterránea (en pozos) que pasan por diferentes procesos para convertirla en agua potable (AAA, Sin fecha). A continuación, se mencionará como la AAA trabaja comúnmente el tratamiento de agua potable en las plantas de filtración.

El tratamiento comienza en la toma de agua cruda mediante una parrilla que separa escombros del agua que se envía a la planta (AAA, Sin fecha). El agua es enviada a la

planta mediante bombeo o gravedad. En la planta, regularmente pasa por procesos en el siguiente orden: aeración (aumento oxigenación), aplicación productos químicos (polímeros (coagulantes y/o floculantes), cloro pre (desinfectante)), sedimentación (coágulos y/o flóculos se precipitan por gravedad), filtración (el agua clara que proviene de sedimentador es filtrada por un filtro (regularmente compuesto de piedra, grava, arena y carbón activado/ antracita)), desinfección (se aplica cloro al agua que sale de los filtros en mayor concentración que el cloro pre) y por último el agua potable se distribuye a los clientes a través de una red de tuberías, estaciones de bombas y tanques de distribución (AAA, Sin fecha). El agua que se distribuye cuenta con un residual de cloro que desinfecta las tuberías hasta llegar a los consumidores por lo que continúa protegiendo la calidad del agua (AAA, Sin fecha). En adición, el personal verifica la calidad del agua regularmente monitoreando parámetros de calidad en las plantas de filtración y en la red (AAA, Sin fecha).

b. Sistemas No-AAA

Existen aproximadamente 240 sistemas de agua independientes (No-AAA) en comunidades localizadas en áreas remotas y zonas rurales de la isla que utilizan agua superficial (42%) y subterránea (58%) como fuente de abasto (EPA, 2017), (EPA, 2018). De estos, el 95% aprox. no cumple con los estándares de calidad de agua en turbidez ni coliformes (EPA, 2017) y enfrentan otros problemas como: dificultad de asistencia financiera y de disponibilidad de operadores certificados, pobre infraestructura, límites en el mantenimiento, entre otros (EPA, 2018). Estos sistemas también son regulados por la EPA y DSPR si tienen 15 conexiones o más de clientes (EPA, 2018). Los sistemas con menos de 15 conexiones no son regulados y tienen mayor desventaja sobre los que son

regulados porque el riesgo de enfermedades causadas por agua contaminada en las poblaciones es mayor (EPA, 2018).

Tratamiento de agua potable

El propósito del tratamiento de agua potable es el ofrecer agua de calidad que cumpla con las regulaciones requeridas para proteger la salud pública de los consumidores y los cuerpos de agua (EPA, 2003). Actualmente se han implementado diferentes métodos y técnicas para lograr que el tratamiento de agua potable sea eficiente, seguro y cumpla con la demanda de las poblaciones servidas (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006). Los métodos y las técnicas en el tratamiento dependerán de la fuente abasto de agua y de la calidad de esta (EPA, 2003).

El tratamiento de agua potable comienza con la extracción de agua subterránea (acuíferos subterráneos) o agua superficial (ríos, lagos y represas) y este último es considerado más complejo que el de agua subterránea debido a la exposición directa que tiene con el ambiente (EPA, 2003).

Los tratamientos para agua potable más utilizados son: la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (EPA, 2003). La aplicación de coagulante, mezclado, floculación, sedimentación y filtración es referida como tratamiento de agua convencional (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006) y en la actualidad es comúnmente utilizado para tratamiento de agua potable en Puerto Rico. A continuación, se explicará en detalle cada una de estas etapas:

Coagulación

La coagulación se refiere a la adición de un coagulante (producto químico con carga) al agua que forma partículas pegajosas (coágulos) y que atraen partículas de la tierra (EPA, 2003). Una aplicación apropiada de coagulante aumenta el rendimiento del tratamiento (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006).

Los coagulantes en el tratamiento de agua potable se utilizan para lograr la turbidez requerida en agua filtrada y de distribución, por eso se han desarrollado diferentes coagulantes como el alumbre, polímeros catiónicos, aluminio polimerizado, cloruro de poli aluminio, mezclas de sales metálicas con coagulantes orgánicos, entre otros. (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006).

Floculación

En la floculación las partículas de tierra unidas con los coagulantes forman partículas más grandes (flóculos) que aumentan su peso para facilitar su sedimentación (EPA, 2003). El tiempo de floculación dependerá del proceso utilizado (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006) y el diseño de la planta.

Sedimentación

En la etapa de la sedimentación, las partículas pesadas (flóculos) se asientan de manera natural al fondo y el agua clara continua el tratamiento (EPA, 2003).

Filtración

En este paso, el agua pasa por filtros (algunos hechos de arena, grava y carbón (antracita)), para reducir la presencia de partículas más pequeñas (barro, légamo, hierro,

manganeso, microorganismos, material orgánico natural y precipitados de otros procesos) que continúan presentes en el agua (EPA, 2003). Esta etapa del tratamiento aclara el agua, mejora la desinfección (EPA, 2003) y evita brotes de enfermedades de transmisión por agua (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006) ocasionados por algunos microorganismos.

La filtración de agua potable en los sistemas públicos de los Estados Unidos comenzó en el 1872 y con el tiempo, considerando diferentes factores, se han creado diferentes técnicas o tipos de filtración (filtros de doble medio (antracita y arena fina), de medio mixto (grava, arena y antracita), filtración directa (mezclado, floculación y filtración), filtros de membrana, entre otros.) para optimizar el tratamiento (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006).

Desinfección

La desinfección es considerada como uno de los avances más importantes del siglo 20 en la salud pública ya que elimina microorganismos (patógenos o no patógenos) presentes en el agua (EPA, 2003). Los desinfectantes más utilizados son el cloro, compuestos de cloro y dióxidos de cloro porque son eficientes, costo-efectivos y logran mantener un nivel residual en el sistema de agua (EPA, 2003) para continuar desinfectando la red de tuberías hasta llegar a los lugares donde será consumida. El ozono y radiación ultravioleta son desinfectantes que también se utilizan en el tratamiento de agua (Rhodes Trussell, 2006) pero no producen residual como el cloro.

Las bacterias, los virus y los protozoarios (como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*) se relacionan con las enfermedades transmitidas por el agua

(Rhodes Trussell, 2006). Los protozoarios *G. lamblia* (1970) y *C. parvum* (1980) son más resistentes a la desinfección por cloro, lo que ha ocasionado que a través de los años se adopten y mejoren diferentes métodos en el tratamiento de agua potable para lograr agua segura para el consumo humano (Rhodes Trussell, 2006). La Regla de Tratamiento de Agua Superficial (SWTR) trabaja con patógenos presentes en el agua como *G. lamblia* y *C. parvum* y requiere que los sistemas públicos provenientes de agua superficial sean filtrados y desinfectados para lograr el cumplimiento de estos (EPA, 2022).

Distribución

Una vez que el agua termina el tratamiento, se distribuye mediante gravedad o bombeo por tuberías subterráneas a los clientes (EPA, 2003).

Membrana en tratamiento de agua

En el tratamiento de agua, las membranas son consideradas como un tipo de filtración (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006) y se refieren a ellas como una barrera física semipermeable hecha de material natural o sintético que separa diferentes sustancias (Madhura, et al., 2017) (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018). Muchas son asimétricas (que constan de una capa fina (separadora) y una o varias capas gruesas con poros más grandes que le dan soporte) y su permeabilidad se determina por la capa fina activa (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). En la actualidad las membranas están hechas de polímeros naturales y sintéticos (como acetato de celulosa, triacetato de celulosa, polisulfona, poliamida, entre otros) (Sharma & Bhattacharya, 2017). También pueden estar compuestas de otros tipos de materiales como: cerámica (mecánicamente más estables, con tamaño del poro fácil de manejar y utilizadas en la microfiltración y

ultrafiltración), organo-minerales (intermedio entre las membranas poliméricas y de cerámicas, tienen mayor flujo de agua, utilizadas en ultrafiltración) y metálicas (resistentes a altas temperaturas, corrosión, mayor tiempo de vida, robustas, alta permeabilidad, costosas, utilizadas en la microfiltración) (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). Es muy importante mencionar que las características y la morfología de las membranas pueden afectar la permeabilidad del agua, el rechazo de sustancias de interés a separar y el ensuciamiento de la membrana u obstrucción de la membrana (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018).

La utilización de membranas semi-permeables para remover impurezas del agua en tratamiento de agua, se considera una tecnología innovadora (Sharma & Bhattacharya, 2017). Su uso en el tratamiento de agua municipales de Estados Unidos comenzó con la desalinización de agua salada y agua salobre por osmosis inversa de alta presión cuando en el 1973 se instaló la primera desalinizadora en Florida y en 1990, con la instalación de la primera planta municipal de agua potable en California utilizando microfiltración (MF) y nanofiltración (NF) de baja presión (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006). Aunque la tolerancia al cloro en la mayoría de las membranas es limitada (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003), la membrana en el tratamiento de agua potable es considerada más eficiente que la sedimentación y filtración tradicional (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018). No obstante, se continúan desarrollando nuevas tecnologías en la creación de membranas para obtener técnicas más eficientes en la separación de sustancias y en el ensuciamiento u obstrucción de la membrana (Madhura, et al., 2017). Estas técnicas mayormente son agrupadas en polimerización interfacial (capa fina de polimerización en la superficie de la membrana por la reacción de dos monómeros que forman capas de

películas finas activas eficientes en el tratamiento de agua) e incorporación de nanopartículas (Madhura, et al., 2017).

En la actualidad existen diferentes tipos de membranas comerciales y no comerciales de diferentes materiales (Madhura, et al., 2017) que se pueden utilizar en variedad de usos tales como: tratamiento de agua subterránea para producción de agua (Badea, Farcas, Lacob, & Muresan, 2012), generación de energía (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017), remoción de contaminantes (Cruz Tato, et al., 2017) (Laskawiec, Madej, Dudziak, & Wyczarska-Kokot, 2017) (Hidayati Othdman, y otros, 2022), purificación de agua (Madhura, et al., 2017) (Hidayati Othdman, et al., 2022), aplicaciones farmacéuticas (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018), desalinizar agua del mar (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018) (Hidayati Othdman, et al., 2022), agua salobre para potabilización de agua, producción de agua potable, pre tratamiento, reúso de agua usada (Hidayati Othdman, et al., 2022), etc.

Osmosis del Agua

El paso del agua a través de una membrana ocurre por un proceso llamado osmosis donde un solvente (regularmente agua) pasa a través de una membrana semipermeable (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018). A esto se le conoce como osmosis natural del agua, que ocurre cuando moléculas del agua pasan por una membrana semi-permeable desde el lado con menor concentración de solutos, hacia el lado con mayor concentración de solutos (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017) o desde el lado con mayor cantidad de moléculas de agua al lado con menor cantidad de moléculas de agua hasta equilibrar la presión osmótica (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018).

OSMOSIS NATURAL

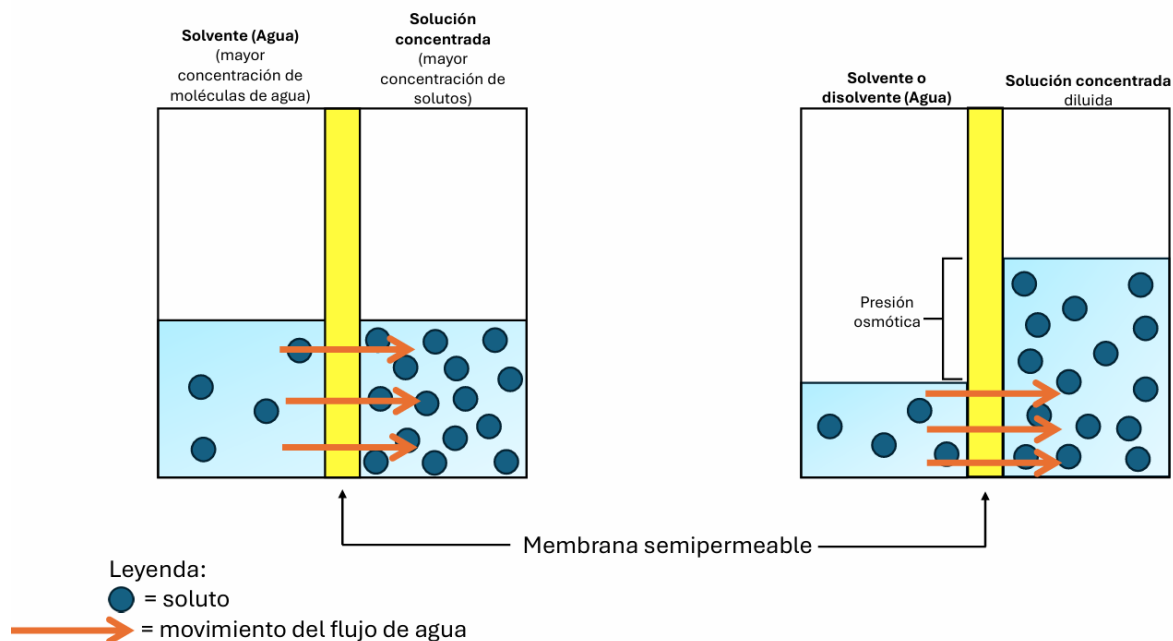


Figura 1. Esquema de osmosis natural del agua. Esquema creado por: Zullymar Vélez.

La presión osmótica, es la presión necesaria para parar la osmosis o detener el flujo del agua a través de la membrana y esta depende de la concentración de solutos (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018). En la figura 1 se muestra un esquema de este fenómeno natural.

Soluciones envueltas en los procesos osmóticos de membrana en tratamiento de agua

Generalmente las soluciones envueltas en los procesos osmóticos son la solución alimentadora (FS, por sus siglas en inglés: “Feed Solution”) y la solución extractora (DS, por sus siglas en inglés: “Draw Solution”).

La selección de una solución extractora es importante para lograr la eficiencia en los procesos osmóticos, por esto debe tener ciertas características como: pH neutral, ser muy soluble, inerte, estable, de bajo costo, causar bajo impacto en la membrana, poseer

bajo peso molecular, baja viscosidad y no ser tóxica (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017). El NaCl (Cloruro de Sodio) es el agente más utilizado en la solución extractora en los procesos osmóticos debido a su bajo costo, alta solubilidad y alto potencial osmótico, no obstante, el tipo de solución alimentadora y pureza del producto requerido en el proceso son factores importantes al momento de seleccionar una solución extractora adecuada (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017).

Procesos osmóticos de membrana en tratamiento de agua

En los procesos de membrana, se utiliza diferencias de presión de concentraciones como fuerza impulsora para lograr la separación y el rechazo de sustancias en una solución (Madhura, et al., 2017). A continuación, se presentarán los diferentes tipos de procesos osmóticos utilizados en el tratamiento de agua por filtración de membrana.

1. Osmosis directa (FO, por sus siglas en inglés: “Foward Osmosis”)

La osmosis directa se refiere a la difusión de agua que ocurre naturalmente del lado de menor concentración de solutos o con menor presión osmótica (solución alimentadora) al lado con mayor concentración de solutos o con mayor presión osmótica (solución extractora) por la diferencia en presión osmótica de las soluciones, donde no se utiliza presión hidráulica (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017). Al final de este proceso la solución alimentadora se concentra y la solución extractora se diluye (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018). En la figura 2 se presenta el proceso osmótico de osmosis directa, que utiliza el mismo mecanismo de movimiento de partículas de agua que la osmosis natural.

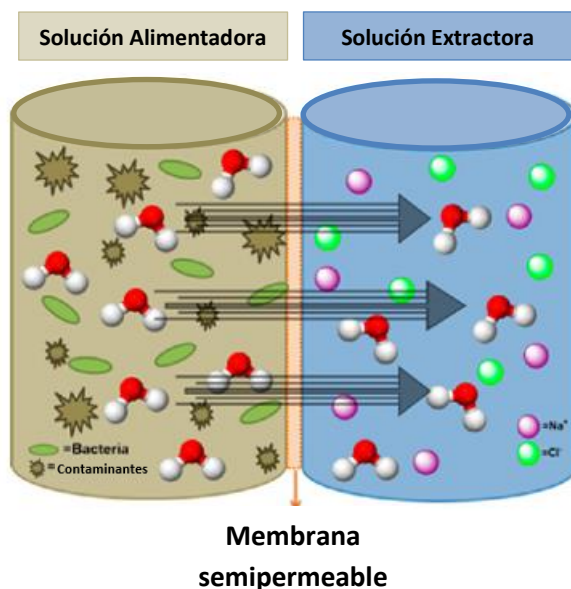


Figura 2. Representación del proceso osmosis directa. (Cruz Tato, y otros, 2017).

En esta osmosis el movimiento de solutos ocurre en dos direcciones al mismo tiempo: de la solución alimentadora a la solución extractora (difusión directa) y de la solución extractora a la solución alimentadora (difusión reversa), esta última, disminuye la fuerza de la osmosis y el transporte de agua, afectando la eficiencia pudiendo también aumentar el costo del proceso es por esto que se recomienda que la solución extractora debe tener el mínimo transporte de flujo reverso de la solución extractora a la solución alimentadora (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017). Además de esto, la osmosis directa presenta otros retos que se deben considerar como: lograr reducir la polarización de la membrana, optimizar el proceso de flujo (mayor flujo de agua, menor flujo reverso de sal y de soluto de la solución extractora), entre otros (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017). No obstante, la osmosis directa cuenta con grandes ventajas que superan a la osmosis inversa como: poco consumo de energía por lo que es más costo efectiva, tiene menor ensuciamiento u obstrucción de la membrana por tener menos presión la membrana, posee alto rechazo de contaminantes, (Korenak, Basu,

Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017) y brinda alto flujo de agua (Cruz Tato, et al., 2017) (Cruz Tato, Rivera Fuentes, Flynn, & Nicolau, 2019). La osmosis inversa es uno de los tratamientos de purificación de agua más usado a nivel mundial (Sharma & Bhattacharya, 2017) no obstante, la osmosis directa ha tomado ventaja en la purificación de agua debido a esto (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017).

Las membranas para la osmosis directa se clasifican en dos tipos por sus estructuras: asimétrica con piel integral (ISA, por sus siglas en inglés: “Integrally Skinned Asymmetric”) y compuesta de película fina que son preparadas en dos pasos (Tian, et al., 2022). Las membranas asimétricas con piel integral son mayormente fabricadas de triacetato de celulosa (CTA por sus siglas en ingles) y regularmente tienen baja permeabilidad (Tian, et al., 2022). Las membranas TFC han sido más estudiadas en laboratorios en comparación con las membranas asimétricas con piel integral y son más comercializadas por la selectividad y permeabilidad que pueden brindar adaptando las mismas (Tian, et al., 2022).

La osmosis directa ha sido aplicada en generación de energía, procesamiento de alimentos, desalinización de agua, tratamiento de agua usada (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017), purificación de agua y aplicaciones farmacéuticas (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018).

2. Osmosis directa asistida

La osmosis directa asistida es lo mismo que la osmosis directa solo que se añade la aplicación de presión hidráulica a la solución alimentadora para mejorar el proceso y aumentar el flujo de agua (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017).

3. Osmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés: “Reverse Osmosis”)

En la osmosis inversa el agua pasa por la membrana en dirección opuesta (del lado menos diluido al más diluido) utilizando una fuerza externa (hidráulica) que otorga más presión a la presión osmótica del agua (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018) ocasionando que el flujo sea en dirección opuesta a lo natural esperado.

Algunas ventajas que ofrece la osmosis inversa son: no forma compuestos químicos peligrosos, remueve efectivamente muchos contaminantes, microorganismos y no altera el sabor ni olor del agua, aunque también presenta desventajas como: alto consumo de energía por la presión hidráulica (aumentando costos en operación y mantenimiento), eliminación de minerales (que pueden ser beneficiosos) y ensuciamiento u obstrucción de la membrana (aumentando el mantenimiento o reemplazo de membrana) (Sharma & Bhattacharya, 2017). La osmosis inversa ha sido más utilizada en la desalinización de agua de mar (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018) y purificación de agua (Sharma & Bhattacharya, 2017).

4. Osmosis retardada por presión

La osmosis retardada por presión utiliza presión hidráulica en la solución extractora, pero la diferencia en presión osmótica entre la solución alimentadora y la solución extractora es mayor que la presión hidráulica ejercida en la solución extractora, por lo que el flujo de agua ocurre como quiera de la solución alimentadora a la solución extractora, opuesto a lo que ocurre en la osmosis inversa (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017). Esta combina factores de la osmosis inversa (utilización de presión hidráulica) y de la osmosis directa (difusión de agua es de la solución alimentadora

a la solución extractora) y se ha utilizado en la generación de energía eléctrica (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017).

Problemas que afectan las membranas en tratamiento de agua

1. Ensuciamiento u obstrucción de la membrana

El ensuciamiento u obstrucción de la membrana se refiere a la acumulación de sustancias (orgánicas, inorgánicas, microbianas y particulado) en la superficie de una membrana que bloquean parcial o completamente los poros en la misma ocasionando aumento en la demanda de energía, mantenimiento, limpieza de membrana, reducción en su vida útil y en la capacidad de filtración (Madhura, et al., 2017). Esto es un problema que ocurre mayormente en los sistemas de membrana impulsados por presión (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003) ya que la presión impulsada afecta y puede agravar el ensuciamiento u obstrucción existente. Se debe de tomar en consideración de que la membrana obstruida y su gravedad también dependerán de diferentes factores entre estos: calidad del agua a filtrar, temperatura, diseño del sistema, limpieza de la membrana, flujo de agua, superficie de la membrana, tamaño de las sustancias, entre otros (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017). Para evitar este tipo de problema se debe evaluar cada uno de los factores anteriormente mencionados y desarrollar e implementar métodos que optimicen la filtración y/o tratamiento con membrana como por ejemplo: identificar el tipo de ensuciamiento u obstrucción, realizar diseños, métodos de control que mejoren el sistema o proceso y realizar estudios con la membrana (caracterización) (Madhura, et al., 2017) como modificación de la superficie de membrana y selección de materiales en la membrana (Korenak, Basu, Balakrishnan, Nielsen, & Petrinic, 2017).

2. Polarización de concentración

La polarización de concentración (CP, por sus siglas en inglés: “Concentration Polarization”) es similar en todos los procesos de separación de membrana donde se permite la transferencia selectiva de algunas sustancias a través de una membrana mediante el gradiente de concentración en la interfaz de la solución de membrana (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018). Esta se puede clasificar en interna (ICP por sus siglas en inglés) y externa (ECP por sus siglas en inglés) (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). El uso de pequeñas moléculas y iones en la solución extractora, reduce la polarización de concentración interna, pero ocurre la difusión reversa de sal (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018).

3. Difusión de soluto reverso

La difusión de soluto reverso es la penetración o difusión de un soluto a través de la membrana en el proceso de osmosis directa desde la solución extractora hacia la solución alimentadora por el gradiente de concentración (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). Esto disminuye la fuerza impulsora osmótica, el rendimiento de la membrana y aumenta la polarización de concentración (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). Una alta difusión de soluto reverso ocasiona contaminación en la solución alimentadora y gran pérdida del soluto en la solución extractora (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). Para mitigar esto, se recomienda selectividad de la membrana (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023).

La polarización de concentración interna, el ensuciamiento u obstrucción de la membrana y la difusión de soluto reverso, son determinados por las propiedades de la solución extractora (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018).

Procesos de membranas impulsados por presión en filtración de agua por membrana

Los procesos de membrana más usados en aplicaciones de purificación de agua son la osmosis inversa (RO), nanofiltración (NF), microfiltración (MF), y la ultrafiltración (UF) (Cruz Tato, et al., 2017), pero todos requieren una presión hidráulica externa para trabajar (Rastgar, Shakeri, & Salehi, 2019) por eso son reconocidos como tecnologías o procesos de membrana impulsados por presión. Estos, utilizan la diferencia en presión entre la solución alimentadora y el lado permeado para transportar un solvente (regularmente agua) a través de la membrana y realizar la separación de sustancias (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). A continuación, se brindará información de cada uno de ellos:

a. Osmosis inversa (RO)

Son membranas densas sin poros definidos que tienen baja permeabilidad (0.05-1.5 l/h.m²) por lo que requiere de mucha presión (5-120 bar) y alta energía, rechaza iones monovalentes y multivalentes, compuestos orgánicos pequeños, macromoléculas y partículas, usa como mecanismo de separación solución-difusión, y es utilizada en agua ultrapura y desalinización (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). El tamaño del poro puede variar de $\leq 1\text{nm}$ aprox. (Sharma & Bhattacharya, 2017).

b. Nanofiltración (NF)

Tienen permeabilidad de 1.5-30 l/h.m². bar, trabaja con presión de 3-20 bar, rechaza iones multivalentes, compuestos orgánicos pequeños, macromoléculas y partículas, el mecanismo de separación es el tamizado con efectos de carga (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003), disminuye olor,

color, dureza (Madhura, et al., 2017) y son utilizadas en tratamiento de agua industrial, desalinización de agua del mar o salobre e industrias farmacéuticas, purificación de agua y tratamiento de agua usada (El-Zahhar, Alghamdi, Alshahrani, Awwad, & Idris, 2022). El tamaño del poro varía de aproximadamente a $<1\text{nm}$ (Sharma & Bhattacharya, 2017). Son consideradas como una subclase de RO (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006).

c. Microfiltración (MF)

Tienen la mayor permeabilidad ($>1,000\text{ l/h.m}^2.\text{bar}$) y tamaño de poro, lo que permite filtrar grandes cantidades de flujo a baja presión (0.1-2 bar), rechaza partículas y bacterias (aunque los virus y gérmenes no son removidos) que pueden ocasionar problemas en otros pasos del tratamiento, el mecanismo de separación es el tamizado y es utilizado en clarificación, pretratamiento (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). El tamaño de poro es de $>10\text{nm}$ (Sharma & Bhattacharya, 2017).

d. Ultrafiltración (UF)

Tienen permeabilidad de $10\text{-}1,000\text{ l/h.m}^2.\text{bar}$, trabaja con presión de 0.1-5 bar, rechaza iones monovalentes, macromoléculas (material orgánico natural (NOM por sus siglas en inglés), bacteria y virus) y partículas, utiliza el tamizado como mecanismo de separación y es utilizado en pretratamiento y purificación de agua (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). El tamaño del poro es de $1\text{-}100\text{nm}$ (Sharma & Bhattacharya, 2017). En tratamiento de agua para consumo humano, es eficiente removiendo partículas suspendidas,

coloides, turbidez, algas, bacterias, parásitos, virus y puede sustituir todos los procesos del tratamiento convencional (coagulación, floculación, sedimentación y filtración) o trabajar en conjunto con la microfiltración y algún proceso convencional en el tratamiento de agua para consumo humano aunque presenta problemas de ensuciamiento u obstrucción de la membrana (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003).

Las osmosis inversa y la nanofiltración son eficientes en remover contaminantes disueltos, controlar orgánicos (color, pesticidas, subproductos de desinfección) e inorgánicos, mientras que la microfiltración y la ultrafiltración pueden remover contaminantes microbiológicos (quistes de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*), producen agua con turbidez <0.05 NTU, requieren menos trabajo que las plantas de coagulación/ filtración pero solo pueden remover algunos contaminantes disueltos (Logsdon, Horsley, Freeman, Neemann, & Budd, 2006).

Estas técnicas cuentan con variedad de características y funciones que pueden optimizar el tratamiento de agua por eso es muy importante seleccionar adecuadamente las técnicas, métodos y materiales para lograr que los procesos sean óptimos, costo-efectivos y eficientes tanto en tratamiento como en la calidad del agua.

Módulos de membrana en tratamiento de agua

Los módulos de membrana son arreglos de membrana diseñados para aumentar la eficiencia de las membranas (Badea, Farcas, Lacob, & Muresan, 2012). Existen diferentes tipos de módulos de membrana para tratamiento de agua que a continuación se mencionaran: 1. placa y marco (láminas planas y utilizadas usualmente en laboratorios por

su simplicidad.), 2. fibra hueca (fibras huecas alineadas y aseguradas dentro de una carcasa tubular, usadas en la producción de jugo de manzana, alcohol, agua salina, tienen bajo consumo de energía, alta tendencia al ensuciamiento u obstrucción de la membrana.), 3, membrana tubular (membrana en forma de tubo colocada entre cilindros paralelos de fluido caliente y frio, tiene baja tendencia al ensuciamiento u obstrucción de la membrana, fácil mantenimiento, atractiva para aplicaciones comerciales, altos gastos en operación), 4. membrana enrollada en espiral (láminas planas y espaciadores enrollados alrededor de un área perforada, tienen baja tendencia de ensuciamiento u obstrucción de la membrana y son moderadas en consumo de energía.), 5. pervaporación (Ofrece alto rechazo de sal, la membrana compuesta de película fina aumenta la selectividad, desempeño, resistencia al cloro, solventes y al ensuciamiento u obstrucción de la membrana.), 6. microfiltración /ultrafiltración /nanofiltración (Mayormente difieren en el tamaño del poro, microfiltración tiene poros grandes que solo rechaza grandes microorganismos, ultrafiltración el poro es más pequeño que la microfiltración y puede rechazar bacteria y super moléculas solubles, ambas han sido utilizadas para tratamiento y purificación de agua, nanofiltración rechaza partículas coloidales, restringir iones y es la que entre estas, tiene los poros más pequeños, usada para remover materia orgánica, tratamiento agua usada, recuperación y suavizar agua.) (Aliyu, Rathilal, & Isa, 2018).

En la osmosis directa los módulos de membrana disponible son: membrana enrollada en espiral, placa y marco y fibra hueca (Tian, et al., 2022). Los módulos de membrana enrollada en espiral y fibra hueca funcionan para soluciones alimentadoras con bajas viscosidades mientras que los módulos de membrana de placa/marco y fibra hueca

son eficientes para líquidos viscosos y reducen el ensuciamiento u obstrucción de la membrana (Tian, et al., 2022).

Tratamiento de agua potable con membrana

El surgimiento del tratamiento de agua potable con membrana comenzó en el 1980 cuando un investigador llamado Francois Fiessinger creía que la filtración por membrana podía reemplazar la filtración de medio granular en tratamiento de agua potable de sistemas municipales y por eso creó junto con dos hombres (Andrew Benedek, Dennis Hanley) membranas y compañías para el tratamiento de agua potable llamadas Aquasource, ZENON y Memtec/Mencor respectivamente (Rhodes Trussell, 2006). Entonces, para el 1994, se creó la primera planta de agua potable con la membrana Memtec de Hanley (Rhodes Trussell, 2006).

Loeb y Sourirajan alrededor del 1960 desarrollaron la primera membrana de osmosis inversa (membrana asimétrica de acetato de celulosa) que fue exitosa y luego los investigadores de Estados Unidos comenzaron a diseñar la configuración enrollada en espiral para módulos de membrana y la membrana compuesta de película delgada o capa fina (Rhodes Trussell, 2006).

Plantas de tratamiento de agua potable de membrana en Puerto Rico

Actualmente la AAA cuenta con siete plantas de filtración de membrana de agua potable en la isla (O. Nieves, Comunicación personal, 16 de julio de 2019) (C. Carmona, Comunicación personal, 16 de julio de 2019) (J. González, Comunicación personal, 16 de julio de 2019) (A. Dávila, Comunicación personal, 16 de julio de 2019). Cuatro de ellas pertenecen a la región norte de la AAA (PF Hatillo Camuy (localizada entre los pueblos de

Hatillo y Camuy), PF Sanamuerto (Orocovis), PF Santa Isabel (Utua) y PF Jayuya Urbano (Jayuya)) que tratan aguas provenientes de ríos (O. Nieves, Comunicación personal, 16 de julio de 2019) y tres de ellas pertenecen a la región sur de la AAA (PF Patillas (Patillas), PF Toa Vaca (Villalba) y PF Yauco (Yauco)) que tratan aguas provenientes de lagos (C. Carmona, Comunicación personal, 16 de julio de 2019).

A continuación, se presentará información relevante de una de las plantas de filtración por membrana pertenecientes a la región sur de la AAA mediante una visita realizada (P. Vázquez, Comunicación personal, 23 de julio de 2019) (M. Feliciano, S. Jiménez, Comunicación Personal, 23 de julio de 2019).

Esta planta de tratamiento de agua potable fue construida en 2007 con el propósito de tratar agua mediante membrana. Tiene una capacidad de 7.5 MGD y suple a aproximadamente 50,000 clientes. El agua, proveniente de un lago (ver figura 3), llega a la planta mediante bombeo.



Figura 3. Lago donde proviene el agua cruda para la planta de filtración de membrana de la región sur de la AAA. Foto tomada por Zullymar Vélez.

Al llegar a la planta, el agua entra al tanque de mezclado rápido (2). Luego, el agua se divide en cuatro trenes donde a la entrada de cada uno, hay una compuerta que controla el flujo. Al entrar al tren, el agua pasa por los floculadores (8 en total y 2 en cada tren) para luego, el agua cae por desborde hacia los filtros de membrana (4 en total) mediante una pared que divide los floculadores de los filtros. Cada filtro tiene 5 casetes (cada uno con 64 módulos de membrana) y un espacio para un casete de repuesto lo que permite manejar la demanda de flujo filtrado (ver figura 4).



Figura 4. Casete con módulos de la membrana Zeeweed 500D. Foto tomada por Zullymar Vélez.

Durante la filtración, las membranas están en constante movimiento debido a que en todo momento se le está inyectando aire a las mismas con unas bombas. Las membranas tienen un retro lavado automático cada media hora. Mediante unas bombas se succiona el agua filtrada por membrana y luego va hacia una columna. En la columna, se separa el aire del agua mediante unas bombas de vacío. El aire es descartado a la atmósfera y el agua pasa a un tubo principal donde se le inyecta cloro para dirigirse al tanque de distribución y posteriormente a ser distribuido por gravedad. Esta planta no posee sedimentador.

La filtración utilizada en esta planta es clasificada como ultrafiltración. La membrana utilizada para el tratamiento de agua en la planta es Zeeweed 500D. El material de esta membrana es de Polifluoruro de vinilideno (PVDF, por sus siglas en inglés: Polyvinylidene Fluoride), el módulo es de fibra hueca, su diámetro es de 1.9mm OD/ .8mmID, el tamaño del poro es de 0.04 micrones y la superficie de esta es no iónica e hidrofílica. El agua se bombea hacia la membrana, donde se retienen los compuestos no deseados. Algunos de los cuidados que se realizan en la planta para mantener la membrana en óptimas condiciones son: lavados con hipoclorito de sodio, lavados con ácido cítrico, prueba de integridad de la membrana (MIT, por sus siglas en inglés: “Membrane Integrity Test”) y reparaciones de membrana. Los lavados con hipoclorito de sodio se utilizan cuando la contaminación proviene de material orgánico (Ej. Algas). Este lavado se realiza en todo el tren. El tren afectado se saca fuera de operación y se sumerge en 500ppm de cloro por 24 horas. Luego, se realiza

proceso de neutralización aplicando bisulfito al tren hasta que no haya residual de cloro. Por último, se descarta el agua. El lavado de ácido nítrico se utiliza cuando la contaminación proviene de material inorgánico (Ej. Manganese). Este lavado también se realiza en todo el tren, sacando fuera de operación al tren afectado y sumergiéndolo en ácido cítrico por 24 horas. Durante este lavado el pH disminuye a 3, por esto se realiza un proceso de neutralización que conlleva soda caustica hasta aumentar el pH a 6 aproximadamente antes de descartar el agua. Para considerar el lavado también se utiliza como referencia la presión interna de la membrana, la cual debería estar de -1psi a -7.5psi. El MIT se realiza para conocer cuan funcional y optima están las membranas. La misma es realizada diariamente en la planta. Para ello, se apaga el tren, se inyecta aire al casete que contiene las membranas, para que estas se inflen. Luego se deja reposar durante 10 minutos para se desinflen. El resultado óptimo es Log 4 que indica remoción de todo. El resultado podría indicar si hay alguna rotura en la membrana y de estar afectada, reflejarse en la turbidez de filtro y distribución. Las reparaciones de membrana consisten en cortar el fideíllo afectado (o área afectada), removerlo, descartarlo y ponerle silicona para sellar el área. Los fideíllos no pueden ser reemplazados por lo que las membranas, módulos y casetes pierden su razón de filtración. Si la membrana necesita mantenimiento o presenta algún problema, se refleja en la presión de la membrana. Para evaluar esto, se realiza la prueba MIT y la prueba de presión de la transmembrana (TMP, por sus siglas en inglés: “Transmembrane Pressure”). Si en el TMP tiene un resultado alto, podría significar problemas en

turbidez o rotura en la membrana. Si la turbidez aumenta mucho, el tren se apaga automáticamente como medida de control.

Membrana compuesta de película o capa fina

Cuando una membrana tiene diferentes capas de distintos polímeros se dice que es una membrana compuesta de película o capa fina (TFC, por sus siglas en inglés: “Thin Film Composite”) (Bruggen, Vandecasteele, Gestel, Doyen, & Leysen, 2003). Este tipo de membrana fue propuesta por Francis y luego desarrollada por Cadotte y Riley, donde diseñaron una membrana que tenía una capa fina de rechazo (para aumentar rechazo en iones de interés) y un soporte poroso de membrana (para disminuir la resistencia hidráulica) (Rhodes Trussell, 2006). A Cadotte se le conoce como su pionero al introducirla a finales de 1970 (Rastgar, Shakeri, & Salehi, 2019).

Regularmente la membrana TFC está compuesta de una capa de poliéster (sustrato) que da soporte mecánico, una capa intermedia de polisulfona porosa que también da soporte (unida a través de inversión de fase) y una capa o película de poliamida fina (suficientemente densa para separar los iones de sal del agua y suficientemente delgada para permitir el transporte del agua con baja resistencia) (Chowdhury, Steffes, Huey, & McCutcheon, 2018). La capa de poliamida formada mediante polimerización interfacial (IP, por sus siglas en inglés: “Interfacial Polymerization”) (reacción entre una amina (m-fenilendiamina (MDP, por sus siglas en inglés: “m-phenylenediamine”)) en fase acuosa y un ácido (cloruro de trimesoilo (TMC, por sus siglas en inglés: “trimesoyl chloride”)) en fase orgánica) (Chowdhury, Steffes, Huey, & McCutcheon, 2018) le otorga selectividad y resistencia al ensuciamiento u obstrucción de la membrana (Madhura, et al., 2017).

Las membranas de poliamida ofrecen mayor flujo de agua filtrada (permeabilidad) y mayor rechazo de sal al compararlas con otras membranas comerciales como las membranas asimétricas de acetato de celulosa (Cruz Tato, et al., 2017) y las utilizadas en la osmosis inversa (Al-Hobaib, Al-Sheetan, Shaik, & Al-Suhybani, 2017). La capa de poliamida es la encargada de esto debido a que la poliamida brinda hidrofiliicidad lo que ayuda a la permeabilidad y al no ser porosa evita el flujo reverso de sal (Cruz Tato, et al., 2017) actuando como barrera. Se ha evidenciado que la capa de soporte de polisulfona es eficiente en la purificación de agua y remoción de contaminantes (El-Zahhar, Alghamdi, Alshahrani, Awwad, & Idris, 2022) lo que es beneficioso para el tratamiento de agua. El diseño y la estructura de las capas aportan a un mayor rechazo de soluto, permeabilidad y estabilidad mecánica (El-Zahhar, Alghamdi, Alshahrani, Awwad, & Idris, 2022).

A pesar de que las membranas TFC ofrecen un sin número de ventajas, también se debe mencionar las desventajas que tienen como: que su uso en la osmosis inversa y nanofiltración las hacen propensas a alto ensuciamiento u obstrucción de la membrana (Chowdhury, Steffes, Huey, & McCutcheon, 2018) y que el más que les afectan son el de especies biológicas y orgánicas (Rastgar, Shakeri, & Salehi, 2019). Algunas pueden tener baja hidrofiliicidad, pero los científicos pueden realizar cambios en ellas (por ejemplo añadiendo aditivos para hidrofiliicidad o utilizando otros monómeros con hidrofiliicidad) para mejorarlas (Rastgar, Shakeri, & Salehi, 2019) y optimizar sus aplicaciones.

A este tipo de cambios que los científicos realizan en las membranas se le conocen como modificaciones de membrana. Estas modificaciones tienen como propósito mejorar el rendimiento y funcionamiento de la membrana ya que esto puede verse afectado por distintas variables como en la formación de la capa activa de poliamida (Ej. tipo de

monómero, concentración, tiempo de contacto de polimerización interfacial, temperatura y solvente) (Rastgar, Shakeri, & Salehi, 2019). La modificación de los materiales en la capa superior y las capas porosas también pueden influir en la efectividad de la separación de sustancias y la estabilidad de la membrana (Akbari & Mojallali Rostami, 2014). A través del tiempo, de los estudios y los hallazgos, muchos investigadores de las membranas TFC han añadido varios aditivos a las propiedades de la membrana, modificado la capa de poliamida o la capa porosa para mejorar sus propiedades y lograr mayor desempeño en términos de permeabilidad, rechazo y ensuciamiento u obstrucción de la membrana (Kolangare, Isloor, Inamuddin, Asiri, & Ismail, 2019) (Tian, et al., 2022).

Las TFC han sido utilizadas junto con la osmosis inversa en la desalinización del agua de mar (Rhodes Trussell, 2006) y en la actualidad continúan utilizándose en esta que es un proceso donde se remueven las sales de agua salina para convertirla en agua dulce, por lo que puede ser una solución a la escasez de agua potable (Kolangare, Isloor, Inamuddin, Asiri, & Ismail, 2019). También han sido utilizadas y comercializadas en la purificación de agua (para nanofiltración, osmosis inversa y osmosis directa) (Shen, et al., 2022) y en la actualidad el uso de las membranas TFC de poliamida se centra en esto, siendo las más exitosas en la comercialización (Yu, et al., 2022).

Osmosis directa utilizando membrana TFC

En el campo de la osmosis directa, las membranas TFC son pioneras en aplicaciones reales (Cruz Tato, et al., 2017) por lo que son comercializadas por varias compañías ya que han sido más estudiadas que otras membranas (como la de triacetato de celulosa (CTA, por

sus siglas en inglés: “Cellulose Triacetate”)) en la osmosis directa y se caracterizan por ser selectivas y permeables (Tian, et al., 2022).

En el diseño de las membranas TFC para el proceso de osmosis directa se necesita que la capa de soporte sea hidrofílica, brinde estabilidad química y termal para la resistencia mecánica, sea de alta porosidad y baja complejidad del flujo al recorrerla (tortuosidad) para aumentar el flujo de agua y para que sea eficiente (Cruz Tato, et al., 2017).

Aunque hay muchos beneficios las membranas TFC en osmosis directa, estas presentan tres principales retos (polarización de concentración, ensuciamiento u obstrucción de la membrana y difusión reversa de soluto que pueden afectar su efectividad aumentando la resistencia y disminuyendo la permeabilidad de la membrana (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). La polarización de concentración complica el proceso de osmosis directa, cuando baja la efectividad de la fuerza osmótica impulsora por la acumulación de solutos dentro y/o en la superficie de la membrana afectando su rendimiento y cuando ocurre, generalmente se da en ambos lados de la membrana (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). La polarización de concentración en osmosis directa no puede eliminarse, pero si puede ser reducido o mitigado modificando la membrana (Ej. aumentar porosidad, hidrofílicidad y disminuir tortuosidad) para disminuir la polarización de concentración interna por ejemplo (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). El ensuciamiento u obstrucción de la membrana en osmosis directa puede darse interno o externo dependiendo la orientación de la membrana y para atender esto se realizan modificaciones a la superficie de membrana como la incorporación de nanomateriales para eficiencia y resistencia del ensuciamiento u

obstrucción de la membrana en osmosis directa o modificación de membrana mediante la incorporación de polímeros sulfonados hidrofílicos con propiedades para resistencia al ensuciamiento u obstrucción de la membrana para mejor función en membranas TFC-FO (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023). Para mitigar el la difusión reversa de solutos en osmosis directa se puede aumentar la selectividad de la membrana utilizando poliamida (PA) en la superficie de la membrana (capa de rechazo) y un soporte poroso como las membranas TFC de poliamida, para brindar mayor permeabilidad al agua, no obstante, investigadores indican que se necesita más estudios sobre cómo controlar o mitigar la difusión reversa de soluto (Ibraheem, Aani, Alsarayreh, Alsalhy, & Salih, 2023).

Utilización de membranas en purificación de agua

Las membranas han sido utilizadas previamente en investigaciones de tratamiento de agua y han demostrado ventajas en aplicaciones de purificación de agua. A pesar del amplio rango de investigaciones que utilizan TFC en tratamiento de agua, no se encontró un estudio que midiera e hiciera exactamente lo hecho en esta investigación (filtración por membrana no modificada de TFC utilizando osmosis directa de agua cruda y agua tratada de una planta de tratamiento de agua potable en Puerto Rico utilizando parámetros físico-químicos específicos como indicadores de calidad de agua y de la eficiencia de la filtración por membrana) pero a continuación, se presentarán algunas investigaciones relacionadas a la investigación llevada a cabo en este estudio.

- I. En Puerto Rico, se realizó un estudio con membrana TFC, donde se estuvo midiendo diferentes variables para evaluar la eficiencia de esta en filtración por membrana con osmosis directa por (Cruz Tato, y otros, 2017). El estudio

se basó en fabricar varias membranas TFC modificadas químicamente en la capa soporte con compuestos metálicos a base de nanocelulosa, añadiendo nanopartículas metálicas (plata y platino) mediante un agente reductor para mejorar el rendimiento de la membrana. La superficie de nanocelulosa se modificó añadiéndole grupos de amino-silano (-SiO y -NH) para mayor nucleación de las nanopartículas metálicas. Se realizaron diferentes modificaciones en la capa de soporte de la membrana para mejorar las propiedades y eficiencia de la membrana. Las membranas TFC fabricadas modificadas en la capa soporte utilizadas fueron las siguientes: PSF (polisulfona), P:NC (polisulfona con nanocelulosa), P:NC-NH₂ (polisulfona con nanocelulosa y grupos de amino), P:NC-NH₂Ag (polisulfona con nanocelulosa, grupos de amino y nanopartícula de plata) y P:NC-NH₂Pt (polisulfona, grupos de amino y nanopartícula de platino). Estas membranas fueron caracterizadas físicamente por diferentes técnicas para comprobar su integridad y luego se realizó ósmosis directa para evaluar el rendimiento de la membrana con tres diferentes soluciones alimentadoras (agua nanopura, urea en solución acuosa y agua usada de la planta de tratamiento de agua usada regional de Puerto Nuevo de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico en el municipio de San Juan) y se utilizó una solución de cloruro de sodio al %5 w/v (“5% weight/volumen”) como solución extractora. También se midió lo mismo a la membrana comercial Innovación de Tecnología de Hidratación de triacetato de celulosa (HTI-CTA por sus siglas en inglés) para compararla con las

membranas fabricadas en el laboratorio de la Universidad de Puerto Rico recinto de Rio Piedras (UPR-RP). Se encontró que las membranas compuestas de capa fina metalizadas de nanocelulosa (MNC-TFC, por sus siglas en inglés: “Metallized Nanocellulose Thin Film Composite”) fabricadas fueron más eficientes (mayor flujo de agua, mayor rechazo de contaminantes) que la membrana comercial en especial con las muestras de agua usadas probando tener mayor permeabilidad y selectividad. Este estudio fue realizado con el mismo tipo de membrana utilizado en este estudio, pero modificada y el mismo método de proceso osmótico de filtración por membrana de osmosis directa utilizado en este estudio.

- II. En Rumania, (Badea, Farcas, Lacob, & Muresan, 2012), realizaron un estudio donde midieron diferentes parámetros de agua en un sistema de tratamiento de agua de osmosis inversa de una unidad industrial donde se producía poliestireno. En este estudio, se utilizó agua de dos pozos como fuente de agua. Para esto se utilizó, el sistema de osmosis inversa (5µm de filtros de cartucho), una bomba vertical centrífuga de alta presión, módulos de membrana enrollada en espiral (3), indicadores de flujo, válvulas reguladoras de flujo, válvula para muestra de agua, manómetros, metro de conductividad, panel de control y entradas para lavado de osmosis inversa. Las membranas estaban hechas de poliamida y polisulfona montadas en un cilindro de fibra de vidrio y reforzado con poliéster. Ellos utilizaron dos módulos de membrana para el primer paso en tratamiento de agua (tratar agua subterránea de los dos pozos) y un módulo para el segundo paso (tratar

el concentrado del primer paso). Las muestras fueron tomadas semanalmente durante un mes (diciembre) en la fuente de agua, después del primer paso y después del segundo paso. Entre los parámetros medidos figuran: amoníaco, pH, turbidez y cloro. En agua subterránea el pH fluctuó de 7.08-7.1, la turbidez de 0.98 NTU- 1.2 NTU, cloro de 232 mg/L- 302 mg/L y no se detectó amoníaco. En el agua para proceso industrial las fluctuaciones de pH en el primer paso y segundo paso del permeado fueron: modulo 1 (5.59-6.0), modulo 2 (5.40-5.79) en primer paso y modulo 3 (5.55-5.85) en el segundo paso. Por último, en la producción de agua potable las variaciones en lecturas de parámetros fueron las siguientes: pH (5.55-5.85), cloro (8.45-10.68 mg/L) y turbidez (0.07-0.32 NTU). Los niveles aceptados de estos parámetros son: pH (≥ 6.5 a ≤ 9.5), cloro (250 mg/L y turbidez ≤ 5.0 NTU). El cloro incumplió en tres de las muestras del agua subterránea pero luego de recibir tratamiento de RO disminuyeron a menos de 50mg/L. Ellos encontraron que la remoción de pH varió de 19%-22%, cloro varió de un 73%-93% y la remoción de turbidez varió de 97%-98% por lo que se puede utilizar osmosis inversa para producir agua en procesos industriales y agua potable, no obstante, el pH necesita ajustes debido a que no cumplió con lo aceptado luego del tratamiento de osmosis inversa.

- III. En Polonia, (Laskawiec, Madej, Dudziak, & Wyczarska-Kokot, 2017), realizaron filtración por membrana en un estudio donde evaluaron la calidad del agua de agua de retrolavado del filtro de dos lugares diferentes (una piscina interior de una escuela elemental y un jacuzzi interior de un parque

acuático) utilizando dos parámetros físico-químicos (turbidez y absorbancia de luz ultravioleta de 254nm de largo de onda que es un sustituto de carbono orgánico total (TOC, por sus siglas en inglés: “Total Organic Carbon”). Los parámetros de conductividad, pH, cloro residual, cloro total (utilizando un colorímetro portátil II de Hach), amoníaco, nitrógeno de nitrito también fueron medidos. Todas las medidas se realizaron de una sola repetición. Realizaron una prueba para detectar bacterias (Prueba Microtox que es un bioensayo) para documentar cambios en la calidad del agua de retro lavado antes y después de la filtración por membrana. Utilizaron dos tipos de filtración por membrana (ultrafiltración y nanofiltración). Las membranas en este estudio eran membranas planas comerciales: membrana de poliacrilonitrilo (PAN) y nanofiltración con membrana TFC con capa de poliamida (PA) manufacturadas por GE Osmonics Inc. (Estados Unidos). Las membranas fueron caracterizadas por alta resistencia de cloro presente en el agua de retro lavado examinada. Ambas localidades del estudio recibían agua de las tuberías municipales y realizaban el mismo proceso prefiltración, coagulación, filtración en arena-antracita, calentamiento de agua y desinfección con hipoclorito de sodio. El proceso de retro lavado se realizaba en la piscina cada vez que terminaran clases de deportes y en el jacuzzi había pasado 48 desde la última vez del retro lavado. Cabe mencionar que la calidad de agua de retro lavado influyó en la eficiencia de transporte y separación de las membranas usadas. El proceso de filtración se realizó hasta que se recibió el 50% de la solución alimentadora y

utilizaron las siguientes presiones de la transmembrana: 0.2MPa para ultrafiltración y 2.0 MPa para nanofiltración. El área de superficie activa para ambas membranas fue de 0.375m². La filtración por membrana demostró aumento en la calidad de agua de retro lavado con la reducción significativa en turbidez y absorbancia ultravioleta UV254 en ambos tipos de filtración. La nanofiltración demostró mayor rechazo de contaminantes que la ultrafiltración (Prueba Microtox) tanto en la piscina como en el jacuzzi, no obstante, sufrió de bloqueo de poros en la membrana y demostró menor capacidad hidráulica comparada con la ultrafiltración. La filtración por membrana de TFC-PA en el estudio demostró ser más eficiente en el rechazo de contaminantes.

Planta de tratamiento de agua potable donde se muestreó en este estudio

La planta de filtración PF Betances ubicada en el municipio de Cabo Rojo, es parte de la Región Oeste de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico. Esta es una planta convencional y su capacidad de diseño es de 2.0MGD (Millones de galones diarios) que sule a 20,970 ciudadanos aproximadamente (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). El agua cruda proviene del Lago Luchetti ubicado en el pueblo de Yauco, P.R. y llega por gravedad al lago interno en la planta mediante un canal de riego (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Una vez allí, el agua cruda es enviada a la planta mediante bombeo para su tratamiento (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013).

El flujo de corriente de agua cruda se divide en dos módulos de procesos al entrar al proceso de tratamiento de la planta. Cada módulo de proceso cuenta con un mezclador

rápido estático en línea, un floculador, un sedimentador y dos filtros (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). En el mezclador estático rápido de línea se le inyectan dos polímeros (coagulante y floculante) (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Luego el agua pasa a los floculadores donde lentamente continua el mezclado, para aumentar los tamaños de los flóculos y facilitar su sedimentación (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Después pasa a los sedimentadores donde que facilita la sedimentación de los flóculos grandes (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Luego de esto, el agua clara pasa a los filtros de medio mixto (de arena y antracita) y una vez filtrada se le inyecta el cloro de post tratamiento en el agua filtrada combinada para completar el tratamiento, pasar al tanque de distribución y distribuirse por bombeo a distintos sectores del pueblo de Cabo Rojo (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013).

Fuente de abasto de la planta de tratamiento de agua cruda y agua tratada utilizadas en estudio

La fuente de abasto de agua cruda para esta planta de tratamiento proviene del Lago Luchetti en Yauco, Puerto Rico, es un agua clasificada como superficial (por ser proveniente de un lago), son controladas por la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) y la calidad de agua varía dependiendo su ubicación y condición climatológica (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013)

Pruebas de calidad de agua realizadas en la planta de filtración donde se utilizó agua cruda y agua potable en estudio

Como medida de control en el tratamiento del agua de la planta de filtración donde se utilizó agua cruda y tratada para este estudio, se realizan diferentes métodos de análisis de parámetros como: pH, temperatura, alcalinidad, turbidez, cloro libre residual, Prueba de Jarra, hierro, manganeso, cloro total, oxígeno disuelto, etc. y el propósito de estos análisis es el poder garantizar el cumplimiento de los límites estatales y federales establecidos para cada parámetro de calidad de agua y así lograr un tratamiento óptimo y agua potable segura (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). El pH y la temperatura juegan un rol muy importante en el tratamiento del agua ya que muchas reacciones químicas, procesos y eficiencia del tratamiento dependen de estos. Por ejemplo, el pH bajo es beneficioso en remoción de compuestos orgánicos, en los subproductos de desinfección y en la formación de ácido hipocloroso el cual es más efectivo que el ion hipocloroso en la desinfección (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). El consumo o demanda de cloro además del pH, puede afectarse por otros factores como: turbidez, materia orgánica e inorgánica, microorganismos, etc. (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Si el agua es pobre en alcalinidad puede favorecerse a diluir el hierro y manganeso (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Para el control de hierro y manganeso se emplean diferentes procesos en el tratamiento como: aireación, filtración y uso de oxidantes fuertes (cloro) (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013). Algunos de los parámetros establecidos que deben cumplirse son: turbidez máxima de salida de filtros y distribución (0.30 NTU), cloro (0.20 mg/L nivel mínimo y 4 mg/L de nivel máximo de residual desinfectante o MRDLG), hierro (0.3 mg/L de nivel máximo de contaminante de

estándar secundario o SMCL por sus siglas en ingles), manganeso (0.05mg/L SMCL), y pH (6.5-8.5 SMCL) (Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, 2013) (EPA, 2017). De estos, el cloro y la turbidez son parte de las regulaciones nacionales primarias de agua potable, mientras que el hierro, manganeso y el pH están incluidos en las regulaciones nacionales secundarias de agua potable (EPA, 2017).

Parámetros de calidad de agua medidos en este estudio

En este estudio se analizaron los siguientes parámetros de calidad de agua según descritos por la Agencia de Protección Ambiental de Irlanda en su documento informativo: Parámetros de Calidad de Agua Interpretación y estándares (EPA, 2001).

A continuación, se explicará en detalle los parámetros de calidad de agua medidos en este estudio:

1- Alcalinidad

La alcalinidad en el agua es producida debido a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos formados por reacciones en los suelos filtrados a aguas naturales. También se refiere a la capacidad del agua de neutralizar los ácidos. Un agua que tenga baja alcalinidad será más susceptible a la reducción de su pH. Para medir la alcalinidad se pueden utilizar distintos indicadores y los más utilizados son la fenolftaleína (cambio de color en pH 8.3) y el anaranjado de metilo (cambio en color en pH 4.5).

2- Amoníaco

El amoníaco está presente naturalmente en el agua en pequeñas cantidades debido a la actividad microbológica presente y su fórmula química es NH_3 . Tiene

diferentes formas (total, libre, ionizado, no ionizado y libre salino). Su medición, funciona como indicador de contaminación microbiológica donde, resultados altos pueden indicar la presencia de microorganismos patógenos en el agua y interferencia de desinfección con cloro debido a reacciones entre amoníaco y cloro. Se ha demostrado que el amoníaco en forma no ionizada es la más perjudicial para la vida acuática.

3- Cloro residual

La desinfección en las aguas tiene como propósito, eliminar o desactivar microorganismos que pueden ser perjudiciales para la salud humana. Esta puede realizarse de diferentes maneras, pero mayormente se utiliza el Cloro que es conocido como el desinfectante universal por ser un fuerte oxidante, ser costo efectivo de fácil manejo y eficiente desinfectante.

El cloro residual en el agua resulta del proceso de desinfección en el tratamiento de agua. Cuando se aplica cloro como desinfectante en el tratamiento de agua, el cloro reacciona con el agua formando ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl). El ácido hipocloroso se separa formando iones de hipoclorito (ClO^-). El cloro libre residual es la suma del cloro, hipoclorito y ácido hipocloroso. El amoníaco también reacciona con las formas de cloro resultando en la formación de cloraminas (mono cloramina (NH_2Cl), di cloramina (NHCl_2) y tri cloramina (NCl_3)) y su formación dependen de las concentraciones del pH. Las mono y di cloraminas es lo que se conoce como residual combinado. El cloro total es la suma del cloro residual junto con el cloro combinado. El cloro libre es más eficiente en la desinfección que las cloraminas, pero al ser más reactivo desaparece más rápido,

el cloro combinado da protección a largo plazo. La demanda de cloro dependerá de la concentración de amoníaco o materia orgánica presente en el agua. El residual de cloro es necesario para evitar la contaminación del agua, continuando la desinfección en el sistema de distribución.

La utilización de cloro como desinfectante también puede ocasionar problemas con la formación de subproductos de desinfección que son perjudiciales para la salud humana como los trihalometanos (causan problemas en el hígado, riñón, sistema nervioso central) y los ácidos haloacéticos que son subproductos de desinfección que causan cáncer (EPA, 2017). En el Reglamento Nacional Primario de Agua Potable la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos establece un MRDL de 4.0 mg/L para cloro (EPA, 2017) y un mínimo de ≥ 0.2 mg/L.

4- pH

El pH es un parámetro físico presente en todos los líquidos. Es el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrogeno en una solución que lo clasifica en ácido, neutral o básico. La escala del pH es de 0(muy ácido) a 14(muy alcalino). En las aguas naturales el pH frecuentemente tiene valores de 6.5-8.0.

Los valores extremos en el pH pueden ocasionar diferencias organolépticas notables (pH bajo se relaciona con sabor metálico y corrosión mientras que un valor de pH alto es relacionado a sensación resbalosa al tacto, sabor a soda y depósitos (EPA, 2022)). El pH influencia en el comportamiento de otros parámetros en la calidad de agua como: toxicidad de amoníaco, eficiencia en desinfección con cloro, entre otras. El pH en el agua es importante para la vida acuática pudiendo ocasionar

hasta la muerte de peces. El pH es clasificado como un estándar secundario en el Reglamento Nacional Secundario de Agua Potable y la EPA establece un SMCL de 6.5 a 8.5 (EPA, 2022).

5- Turbidez

La turbidez es un parámetro físico que surge de sólidos finos (de partículas de arcilla, sólidos de aguas residuales, limo, lodos orgánicos e inorgánicos, lavados de arena, etc.) que no pueden ser filtrados por métodos regulares. Las partículas que componen la turbidez pueden influenciar en el tratamiento de agua y el proceso de desinfección pudiendo afectar la eficiencia de estos.

La turbidez es una medida que indica calidad de agua y eficiencia en la filtración (EPA, 2003). Un resultado alto de turbidez puede asociarse a la presencia de microorganismos que pueden ser patógenos (EPA, 2003).

A partir del 2005 se estableció que la turbidez no debía superar 0.3NTU en el 95% de las muestras colectadas (EPA, 2003). Hoy día la turbidez continúa siendo un requerimiento regulatorio en la calidad de agua potable y el máximo permitido continúa en ≤ 0.3 NTU en el 95% de las muestras de agua potable del mes en plantas convencionales y plantas donde utilicen filtración directa (EPA, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectó agua cruda y agua tratada de la planta de filtración PF Betances en el municipio de Cabo Rojo, al oeste de Puerto Rico y se determinaron varios parámetros físico-químicos, antes y después de ser filtradas por osmosis directa con una membrana compuesta de capa fina. Se recolectaron muestras en triplicado, estos muestreos fueron realizados bisemanalmente.

La investigación tuvo cuatro fases: (1) recolección de agua cruda y tratada de la planta de tratamiento (para muestras y controles), (2) determinación de parámetros físico-químicos de las muestras y controles (realizados en el laboratorio de la planta de tratamiento), (3) Filtración por membrana a través de osmosis directa de las muestras de agua cruda y muestras de agua potable donde actuaron como soluciones alimentadoras (procedimiento realizado en el Laboratorio de Química de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras (UPR-RP)) (4) determinación de los parámetros físico-químicos de los controles después del proceso y de las soluciones extractoras diluidas con el agua de las muestras (cruda y potable) tratadas luego de la filtración por membrana (realizado en el laboratorio de la planta de tratamiento). Se comparó los resultados de las pruebas físico-químicas realizadas y se evaluó la eficiencia de la membrana para la purificación del agua.

Los análisis químicos realizados fueron los siguientes: alcalinidad, amoníaco, cloro libre y total, pH y turbidez. Los análisis químicos y la filtración por membrana se hicieron por triplicado tanto para agua cruda como para agua potable. Los controles acompañaron en todo momento a las muestras, pero no fueron filtradas por membrana. A los controles se les realizó también los análisis químicos por triplicado.

I. Recolección de muestras

La colecta, almacenaje y transporte de muestras fue regida según los procedimientos descritos en el libro “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017).

Los envases utilizados en la recolección de las muestras eran de un litro de capacidad, de plástico de polietileno, limpios y debidamente identificados. (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017). En este estudio se utilizaron las botellas económicas de boca ancha con cierre de 1L (Material HDPE) (Thermo Fisher Scientific, n.d.).

Las muestras de agua para analizarse fueron colectadas de los dos grifos localizados dentro del laboratorio de la planta de tratamiento: un grifo de agua cruda y un grifo de agua potable. Estos dos grifos localizados en el laboratorio permanecen abiertos durante el día y noche, ya que se toman muestras de agua de estos a cada hora, por lo que no fue necesario esperar de 3 a 5 minutos para coleccionar las muestras, según recomendado (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017). Aun así, se corroboró esta información cada día de colecta de muestra y se documentó si hubo alguna discrepancia.

A. Muestras de agua

- *Agua cruda*

Se colectó una muestra fortuita (“grab sample”) y representativa de la pluma de agua cruda (ver figura 5) en un contenedor plástico de 1 galón. Se colocó el

contenedor debajo del grifo de agua cruda para comenzar a coleccionar la muestra. Se llenó el contenedor de muestra con agua cruda en su totalidad. Se transfirió 1L a una botella para muestra, directamente sin enjuagarlo con agua de muestra. La botella de 1L, no fue llenada en su totalidad, sino que se dejó un leve espacio y se almacenó en una nevera con hielo a $\leq 6^{\circ}\text{C}$. Se obtuvo otro litro del contenedor de muestra de 1 galón, para realizarle los siguientes análisis químicos inmediatamente luego de la colecta: alcalinidad, amoníaco, cloro residual libre y total, pH y turbidez (Ver sección de los métodos de análisis químicos para procedimientos específicos en estas pruebas). Cada uno de estos análisis se realizó por triplicado y se anotaron los resultados.



Figura 5. Grifo de agua cruda de la planta de tratamiento donde se coleccionaron las muestras y controles de agua cruda. Foto tomada por Zullymar Vélez.

La botella con 1L de muestra coleccionada, se almacenó inmediatamente y se transportó hasta el laboratorio de Química de la Universidad de Puerto Rico Recinto de Rio Piedras (UPR-RP) para realizarle filtración por membrana mediante osmosis directa. (Ver sección de métodos: Almacenaje y transporte

de muestras antes de filtración por membrana). El restante de agua colectada sin utilizar se descartó por el fregadero.

- *Agua potable*

Se realizó el mismo procedimiento que la colecta de muestra de agua cruda descrita anteriormente, pero tomando la muestra del grifo de agua potable disponible en la planta de tratamiento (ver figura 6).



Figura 6. Grifo de agua potable de la planta de tratamiento donde se colectaron las muestras y controles de agua cruda. Foto tomada por Zullymar Vélez.

B. Muestras de agua control

- *Agua cruda-Control*

Del contenedor plástico de 1galon con agua cruda previamente colectada del grifo de agua cruda, también se obtuvo 1.78L para ser utilizado como muestra

control. De este volumen de muestra control, se obtuvo 780mL del contenedor para realizarles las pruebas químicas inmediatamente luego de su colecta, por triplicado, al igual que la muestra. De el mismo contenedor se tomó otro litro y se almacenó como muestra control de agua cruda, de la misma forma que las muestras almacenadas para agua cruda y agua tratada.

El método de colecta, almacenaje y transporte fue el mismo que el de la muestra. Se realizaron los mismos análisis químicos que la muestra en el laboratorio (alcalinidad, amoníaco, cloro libre y total, pH, y turbidez) por triplicado. El control acompañó en todo momento a la muestra hasta completar el análisis total de las muestras. El control no fue filtrado por membrana, sólo se analizaron los parámetros antes y después del transporte para compararlos con los resultados obtenidos de las muestras tratadas con la membrana, y documentar algún cambio en los parámetros debido al transporte.

- *Agua potable-Control*

Se realizó el mismo procedimiento de colecta utilizado para el control de agua cruda solo que en este caso se utilizó la muestra del grifo de agua potable para el control de agua potable. Estas muestras no se filtraron a través de la membrana.

II. Almacenaje y transporte de muestras antes de la filtración por membrana

Las muestras que fueron seleccionadas para filtración por membrana fueron transferidas a las botellas de muestra de 1L, tapadas y almacenadas inmediatamente luego de su colecta a $\leq 6^{\circ}\text{C}$ en una nevera portátil con hielo para

asegurar la preservación y evitar que se congelaran. Se tapó la nevera y se transportaron en un vehículo de motor hasta el laboratorio de química de la UPR-RP para realizarle la filtración por membrana. La nevera fue colocada en el piso de área del pasajero en la parte delantera del auto.

Al llegar a la universidad se tomó la temperatura de una muestra piloto de agua destilada (Rius, Garcia, & Sanchez, 2015) con el termómetro portátil H-B de lectura fácil de inmersión parcial de la compañía Bel-Art SP Scienceware, USA (SP Scienceware, 2020). Para esto se insertó el termómetro hasta la marca de inmersión (76mm o 3pulgadas) y se anotó la lectura en grados Celsius (SP Scienceware, 2020).

El único método de preservación utilizado para las muestras de agua colectada a ser transportada fue la temperatura (almacenaje en nevera a $\leq 6^{\circ}\text{C}$) debido a que la muestra fue filtrada por membrana mediante osmosis directa. Se evitó alterar la composición de las muestras por adición de otros preservativos que pudieran interferir en el proceso y resultado de filtración por membrana.

III. Almacenaje y transporte de muestras después de la filtración por membrana

A. Muestras

Una vez filtrada la muestra, se colocó la muestra resultante (solución extractora diluida) en una botella de muestra plástica de 1L, limpia sin enjuagarla previamente con el agua de muestra filtrada resultante. Se tapó y se almacenó inmediatamente luego de que la muestra fue filtrada, a $\leq 6^{\circ}\text{C}$ en la nevera del

laboratorio de la UPR-RP. Se transfirieron de la nevera del laboratorio a una nevera portátil con hielo a una temperatura $\leq 6^{\circ}\text{C}$. La nevera se colocó en el piso del área del pasajero en la parte delantera del auto. Al llegar a la planta de tratamiento se tomó la temperatura a la muestra piloto (Rius, Garcia, & Sanchez, 2015) con el termómetro portátil H-B de lectura fácil de inmersión parcial de la compañía Bel-Art SP Scienceware, USA (SP Scienceware, 2020) y se anotó la misma.

Una vez preservadas y almacenadas, las muestras filtradas resultantes (soluciones extractoras diluidas) fueron transportadas nuevamente a la planta para realizarle los análisis químicos de: alcalinidad, amoníaco, cloro libre y total, pH, y turbidez por triplicado. Este procedimiento se realizó de igual forma tanto para la muestra de agua cruda como para muestra de agua potable.

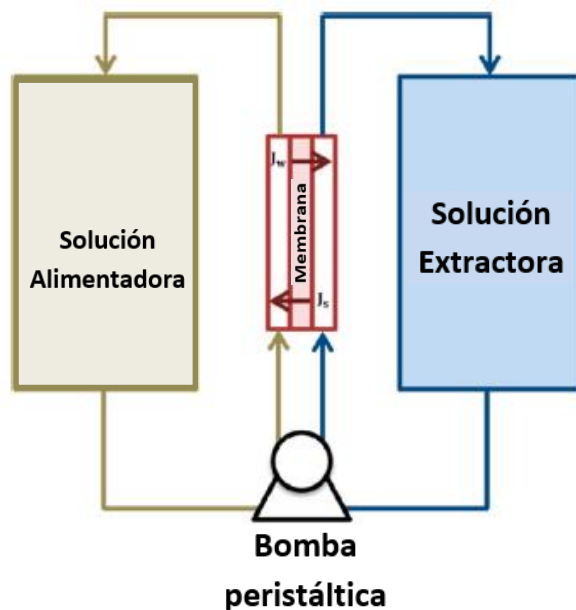
El único método de preservación utilizado para las muestras de agua filtrada transportadas fue mantenerlas a temperatura $\leq 6^{\circ}\text{C}$. Se evitó alterar la composición de las muestras por adicción de otros preservativos que pudieran interferir en el proceso y resultados (Resultados antes de filtración por membrana y resultados después de filtración por membrana).

B. Muestras control

Las muestras control permanecieron junto con las muestras en todo momento. Las muestras control no fueron filtradas por la membrana, pero si se le realizó al igual que las muestras los análisis físico-químicos antes y después del transporte a UPR-RP. Estos análisis de los controles, también se realizaron por triplicado.

IV. Filtración de muestras por membrana compuesta de capa fina por osmosis directa

Las muestras se filtraron por una membrana compuesta de capa fina tipo lámina mediante el proceso de osmosis directa (Cruz Tato, Rivera Fuentes, Flynn, & Nicolau, 2019) en el laboratorio de Química de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras. La membrana utilizada fue una fabricada, compuesta de polisulfona y poliamida (Cruz Tato, Rivera Fuentes, Flynn, & Nicolau, 2019). Para esto, se utilizó un sistema de osmosis directa (ver figura 7), donde la solución alimentadora correspondía al agua de muestra y la solución extractora correspondía a una solución de cloruro de sodio al 5% w/v



(w/v= weight per volume), que eran recirculadas continuamente mediante una bomba peristáltica a través de la membrana (Cruz Tato, et al., 2017).

Figura 7. Diagrama de sistema de osmosis directa a utilizada en el estudio (Cruz Tato, et al., 2017).

La capa activa de la membrana estaba orientada hacia la solución alimentadora y el área expuesta de la misma fue de 4.25cm² (Cruz Tato, et al., 2017). La corrida de membrana se realizó tanto para la muestra de agua cruda como para la muestra de agua potable respectivamente hasta recolectar aproximadamente un litro de solución filtrada, a la que se le harían las post pruebas físico-químicas. El diagrama de la figura 7 esta diferenciado

mediante colores: El color marrón representa la solución alimentadora (agua de muestra) y su flujo, el color azul representa la solución extractora (solución de cloruro de sodio al 5% w/v) y su flujo, el color rojo representa la membrana y el color negro representa la bomba peristáltica. Las flechas representan la dirección de los flujos de las soluciones en el sistema de osmosis directa donde, J_w es el flujo de agua y J_s es el flujo reverso de sal (Cruz Tato, et al., 2017).

Procedimiento filtración por membrana

El montaje, limpieza y corrida de membrana descritos a continuación, se realizaron utilizando los procedimientos practicados en el laboratorio de la UPR-RP partícipe de la investigación para corridas de membrana (P. E. Cruz, Comunicación Personal, 23 de octubre de 2018) (P.E. Cruz, Comunicación personal, 28 de octubre de 2019) (P.E. Cruz, Comunicación personal, 25 de noviembre de 2019).

a. Montaje de sistema

El sistema de corrida es utilizado regularmente en el laboratorio de la UPR-RP, por lo que no se montaba el mismo desde el principio, si no que, en cada día de muestreo, se descartaban las mangas utilizadas del muestreo anterior y se reemplazaban por mangas nuevas. Para el montaje del sistema se utilizó dos balanzas, un soporte con base para la placa donde iba puesta la membrana, una pinza para aguantar la placa de la membrana en el soporte, una bomba peristáltica, cuatro pedazos de mangas plásticas de grosor mediano de un pie de largo aproximadamente (2 identificadas como “output” (salida) y 2 identificadas como “input” (entrada)), dos

pedazos de mangas plásticas de grosor mediano de 4 pulgadas de largo aproximadamente (entrada), dos pedazos de mangas finas de medio pie de largo aproximadamente (entrada), cuatro conectores de tubos, dos vasos de laboratorios (300mL y/o 600mL) y dos probetas de 100mL.

El soporte con base y la bomba peristáltica colocada encima de la base del soporte, se ubicaban en el centro del sistema (Ver figura 6). En cada lado del soporte, estaba ubicada una balanza. Una a la izquierda del soporte y otra a la derecha de este. Se cortaron cuatro pedazos de mangas plásticas de grosor mediano de un pie de largo aproximadamente, dos pedazos de mangas plásticas de grosor mediano de 4 pulgadas de largo aproximadamente y dos pedazos de mangas finas de medio pie de largo aproximadamente. De estas, se dividieron en dos en partes iguales y se identificaron con marcador azul (FS) y marcador negro (DS). Se cerró, ajusto y selló la placa cuidadosamente utilizando seis tornillos. Los tornillos se fueron ajustando en el siguiente orden cuidadosamente: primero se ajustaron las esquinas un poco (4), luego se colocaron los de los lados (2) y se ajustaron. Se apretaron los tornillos de las esquinas primero y luego los centrales hasta sellar la placa. Se colocó la placa en la pinza del soporte con base del sistema y se conectó la misma a dos mangas plásticas de grosor mediano (salida) de un pie de largo aproximadamente, en el superior de la placa para membrana. La manga marcada de color azul se conectó en el lado izquierdo y la manga marcada de color negro en el lado derecho. Luego se unió el pedazo de manga de grosor mediano de 4 pulgadas

aproximadamente marcada de color azul con un pedazo de manga de grosor fino de medio pie de largo aproximadamente marcada de color azul y un pedazo de manga de grosor mediado de un pie de largo aproximadamente marcada de color azul respectivamente utilizando dos conectores de tubos. La manga unida resultante, se conectó en el lado izquierdo por debajo de la placa, utilizando el lado de la manga de grosor mediano de 4 pulgadas aproximadamente para realizar la conexión con la placa de la membrana. Los tres pedazos restantes de mangas marcados de color negro se unieron y conectaron en la placa de membrana de la misma forma que los marcados de color azul, pero la manga unida resultante se conectó en el lado derecho por debajo de la placa. Las mangas por debajo de la placa se clasificaron como (entrada) y las que se conectaron por encima de la misma se clasificaron como (salida).

En cada día de muestreo, las mangas se cambiaban. Se descartaban las usadas y se reemplazaban por unas nuevas.

b. Limpieza

Las dos mangas clasificadas como (entrada) se colocaron en un vaso de laboratorio con agua nanopura. Las mangas clasificadas como (salida) se colocaron en un vaso de laboratorio vacío. Se encendió la bomba peristáltica, oprimiendo el botón hacia arriba y se esperó aproximadamente 30 minutos y/o que pasaran 200mL del vaso de laboratorio que contenía agua nanopura al otro que tenía las mangas clasificadas como (salida). Mientras se limpiaba el sistema, se verificó y aseguró que en el mismo no

hubiese alguna filtración de agua en las mangas y uniones de los tubos en el sistema que pudiese afectar la filtración por membrana. Al finalizar, se vació el sistema de agua nanopura oprimiendo el botón de la bomba peristáltica hacia abajo para vaciar las mangas. El proceso de limpieza del sistema se realizó sin utilizar alguna membrana. Este proceso fue para limpiar el sistema y verificar que el mismo estuviese funcionando correctamente. Se realizó la limpieza del sistema cada vez que se montaba el sistema para correr la membrana. Se limpió cada vez que se iba a comenzar la filtración de agua cruda y agua tratada respectivamente.

c. Preparación corrida de membrana mediante osmosis directa

Se sacó la membrana compuesta de capa fina ya preparada y almacenada. Se midió la misma en la silueta de la placa a utilizarse para la filtración y se cortó con unas tijeras, asegurándose que cubriera toda el área de la membrana en la placa. Se abrió la placa donde iba colocada la membrana y en la parte inferior de la misma se colocó el pedazo de membrana con el lado activo orientado hacia la parte de la solución alimentadora. Se colocó una goma negra en el borde de la silueta hexagonal de la membrana en la parte inferior de la placa para evitar gotereo, pérdida de muestra y sellarla (Ver figura 8).



Figura 8. Placa montada en el soporte con la membrana en su interior. Foto tomada por Zulymar Vélez.

Se cerró, ajustó y selló la placa cuidadosamente utilizando seis tornillos. Los tornillos se fueron ajustando en el siguiente orden cuidadosamente: primero se ajustaron las esquinas un poco (4), luego se colocaron los de los lados (2) y se ajustaron. Se apretaron los tornillos de las esquinas primero y luego los centrales hasta sellar la placa. Se colocó la placa en el soporte del sistema y se conectó la misma a dos mangas clasificadas como entrada por debajo de la misma y a dos mangas clasificadas salida por encima de la misma. La placa y las mangas estaban identificadas por colores para evitar confusión al momento del montaje y facilitar el entendimiento de la corrida. El color azul correspondía a la solución alimentadora (FS) y el color negro correspondía a la solución

extractora (DS). En cada corrida, se midió el volumen a utilizarse de la solución alimentadora (agua de muestra) y de la solución extractora (solución de agua nanopura con NaCl al 5%) en dos probetas vacías previamente limpiadas (Al inicio de cada corrida se comenzaba con 200mL de solución alimentadora y 200mL de solución extractora). Luego de añadirle el volumen deseado, se transfirieron los volúmenes a dos vasos de laboratorios limpios, vacíos, previamente rotulados y pesados en las balanzas. Un vaso de laboratorio era para la solución alimentadora y el otro era para la solución extractora. Luego de transferir los volúmenes a los vasos de laboratorios clasificados e identificados, se pesaron nuevamente junto con el volumen de la solución añadida y se anotó el resultado. Se colocaron las mangas de entrada y salida identificados azules en el vaso de laboratorio de la solución alimentadora y las mangas de entrada y salida identificadas negras en el vaso de laboratorio de la solución extractora. A cada vaso de laboratorio se le colocó parafina para evitar contaminación en la muestra (Ver figura 9).



Figura 9. Filtración por membrana realizada en la UPR-RP. Foto tomada por Zullymar Vélez.

Se encendió la bomba peristáltica para iniciar la filtración. Se anotó el tiempo inicial cuando la primera gota cayó en la solución extractora. Se anotó el tiempo final cuando la última gota del volumen deseado filtrado cayó en la solución extractora. Se anotó el peso de la muestra final de la solución extractora diluida (con volumen aproximado a 500mL) y se almacenó en la nevera del laboratorio a una temperatura de $\leq 6^{\circ}\text{C}$ hasta ser recogidas para ser transportadas. En cada día de muestreo, primero se realizó la corrida de agua de muestra potable hasta completar el volumen deseado de la solución extractora para realizarle las pruebas físico-químicas (500mL aproximadamente). Luego se realizó la corrida de muestra de agua cruda siguiendo las mismas instrucciones de la corrida de agua potable. Una

vez las muestras filtradas estaban completadas se notificaba para ir a buscarlas, llevar las muestras resultantes a la planta y realizarle las pruebas físico-químicas por triplicado a cada solución extractora de agua cruda o agua potable y a los controles.

Los instrumentos y materiales utilizados en la filtración por membrana se limpiaban con una solución de detergente Alconox y agua potable. Luego se enjuagaban con agua nanopura y se dejaban secando o se secaban con toallitas Kim o “Kimwipes”.

V. Análisis químicos realizados en las muestras y controles

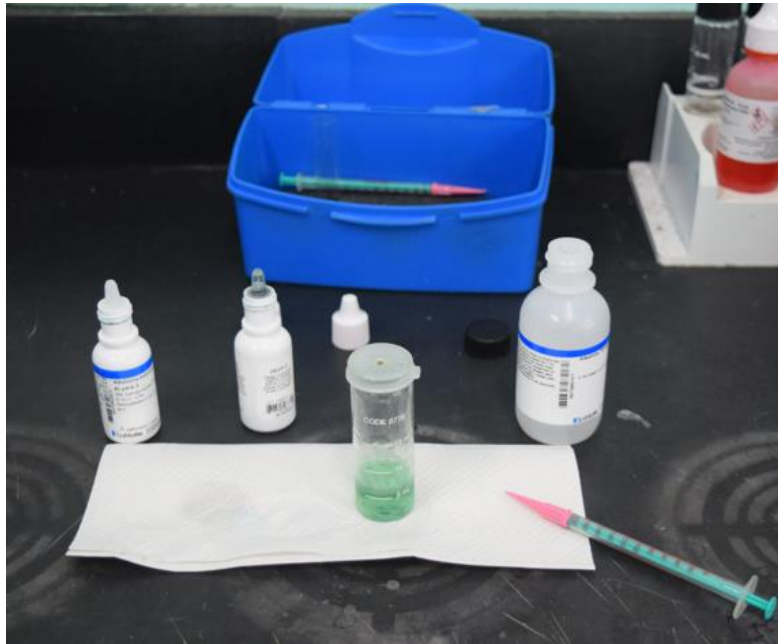
Los análisis químicos descritos a continuación, se llevaron a cabo en el laboratorio de la Planta de filtración de tratamiento. Se utilizaron los mismos instrumentos y procedimientos utilizados para el análisis de aguas tratadas que utiliza el laboratorio de la Planta de Filtración de tratamiento, y es aprobado por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Se leyó y tomó en consideración las recomendaciones dadas en las hojas de datos de seguridad (SDS por sus siglas en inglés) para el manejo de cada reactivo utilizado en los análisis químicos (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017).

Procedimientos de análisis químicos realizados:

A. Alcalinidad - Método: Titulación directa

Se utilizó el kit de titulación de lectura directa (“Direct Reading titration”) de la compañía “La Motte” (ver figura 10) y los procedimientos fueron realizados mediante el

manual general de instrucciones (código 1649) (La Motte Company, 2015) y el manual de instrucciones específicas para la prueba de titulación de alcalinidad directa 0-200ppm



(código 3467-01) (La Motte Company, 2015):

Figura 10. Kit de titulación de lectura directa de la compañía La Motte utilizado para medir alcalinidad en las muestras (agua cruda y agua potable) y controles (agua cruda y agua potable). Foto tomada por Zulymar Vélez.

Se llenó el tubo de muestra (5-10-15mL, de vidrio con tapa) con agua a analizar hasta la marca de 5mL. Se añadió dos gotas del Indicador de Alcalinidad #1. Se tapó y mezcló suavemente. Se añadieron dos gotas del Indicador de Alcalinidad #2 al agua de muestra. Se tapó y mezcló suavemente hasta observar un color azul uniforme en el agua de muestra. Se abrió el Reactivo B de Titulación de Alcalinidad y se insertó el titulador de lectura directa en el orificio del plástico de la botella del Reactivo B de Titulación de Alcalinidad. Se invirtió la botella y se sostuvo ambos firmemente juntos. Se llenó el titulador de lectura directa hasta la línea que marcaba cero con el Reactivo B de Titulación

de Alcalinidad. Se enderezó la botella invertida y se retiró el titulador de la misma. Se insertó el titulador de lectura directa en el agujero del centro de la tapa del tubo de muestra para comenzar la titulación. Se depositó gota a gota en el tubo de muestra mientras que a su vez se movía el tubo de muestra suavemente. Se continuó realizando este paso hasta que se observó cambio de color azul a color verde. Se leyó el resultado de la prueba directamente desde la escala del titulador de lectura directa (Cada línea del titulador de lectura directa equivalía a 4ppm). La lectura se documentó como Alcalinidad Total (T) en ppm CaCO_3 . Se descartó la solución tituladora restante y se enjuagó el tubo de muestra y el titulador sin remover ninguna pieza del titulador.

B. Amoníaco- Método: Amoníaco- Nitrógeno

Precauciones que se tomaron en cuenta antes del análisis:

- La temperatura de la muestra podía influir en el resultado de la prueba (temperatura alta= resultados altos, temperatura baja= resultados bajos). La temperatura recomendada era de 20°C (Hach Company, 2015).

Se utilizó el Kit de prueba de “Ammonia- Nitrogen NI-8” de la compañía HACH y el procedimiento realizado utilizando el manual de instrucciones del Kit de Prueba de Amoníaco Nitrógeno NI-8 (método 224100) (0-3.0 mg/L $\text{NH}_3\text{-N}$). (Hach Company, 2015)

Se enjuagó los dos tubos plásticos que trae el kit de muestra para análisis de agua con el agua a analizar. Se llenaron los dos tubos plásticos hasta la línea que marca 5mL con agua a analizar. Se colocó uno de los dos tubos plásticos con agua a analizar en el compartimiento izquierdo de la caja comparativa de color. Al segundo tubo de plástico preparado con agua a analizar, se le añadió tres gotas del reactivo Nessler y se mezcló

haciendo movimientos circulares suavemente hasta que la muestra se tornó color amarillo. Se esperó un minuto. Se leyó el resultado antes de que pasaran cinco minutos. Para leer el resultado, se colocó el segundo tubo plástico con agua a analizar en el compartimiento de la derecha de la caja comparativa de color a un ángulo levemente superior a los ojos y frente a una fuente de luz (sol o lámpara). Se comenzó a girar el disco de color hasta observar que los colores en ambos tubos eran iguales y se utilizó el valor entre los dos segmentos. Se leyó el resultado en mg/L en la escala. Se multiplicó el resultado leído de la prueba mediante la observación por 1.2 para obtener resultados de amoníaco en mg/L NH_3 . Al finalizar, se lavaron los tubos plásticos con agua desionizada.

C. Cloro libre y total (Rango bajo)- Método: DPD (Almohadillas de polvo) / colorímetro

Precauciones que se tomaron en cuenta antes del análisis (Hach Company, 2017).:

- Se corroboró que el colorímetro estuviera calibrado.
- Se analizaron las muestras a la brevedad posible.
- Si se observó presencia de condensación y/o burbujas presentes se limpió la celda o se invirtió la celda para eliminar las burbujas.
- Se utilizaron celdas distintas para las pruebas de cloro libre y cloro total.
- Para eliminar burbujas de aire al coleccionar la muestra, se recomendaba dejar se desborde el recipiente de muestra con agua a analizar varias veces y luego tapar.

Verificación de calibración del colorímetro portátil Pocket Colorimeter II:

Para la verificación de calibración del equipo se utilizaron los estándares secundarios en gel de la compañía Hach y su procedimiento recomendado (Hach Company,

2018). A continuación, se describirá los pasos realizados que la compañía Hach recomienda en el set de estándares secundarios en gel (Cat No. 2635300) para la verificación de calibración del instrumento “Pocket Colorimeter II” a bajo rango (Hach Company, 2018).

Se retiraron los estándares secundarios en gel junto con el blanco de la caja del set. Se encendió el instrumento. Se limpiaron los tres estándares y el blanco con un papel limpio. Se destapó el instrumento y se colocó el blanco en el instrumento con el triángulo invertido orientado hacia al frente del analizador. Se tapó el instrumento y se presionó la tecla cero. Se destapó el instrumento y se retiró el blanco. Se colocó el primer estándar secundario en gel en el compartimiento del instrumento con el triángulo invertido orientado de frente al analizador y se colocó la tapa al instrumento. Se presionó la tecla de lectura en el instrumento y se apuntó el resultado. Se destapó el instrumento y retiró el primer estándar secundario en gel de este. Se repitieron los pasos para los dos estándares secundarios restantes (Estándar secundario 2 y estándar secundario 3). Las lecturas debían estar dentro de los límites de tolerancia del valor específico en la certificación de calibración. Se colocaron los estándares y blanco en la caja del set hacia arriba y se mantuvieron almacenados a temperatura ambiente.

La verificación de calibración del instrumento se realizó cada vez que se iban a analizar el grupo de muestras, antes de comenzar a analizar las mismas.

Determinación de cloro libre y cloro total en las muestras:

Se utilizó el método DPD (“N, N-diethyl-p-phenylenediamine”) de almohadillas de polvo para el análisis utilizando el instrumento colorímetro portátil II de la compañía

HACH (Hach Company, 2017) (ver figura 11) y el procedimiento del método DPD de almohadillas de polvo del instrumento “Pocket Colorimeter II” para el análisis de cloro libre (método 8021) y total (método 8167) a rango bajo ($.02\text{-}2.00\text{mg/L Cl}_2$). Método aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés).



Figura 11. Instrumento colorímetro portátil “Pocket II” de la marca HACH utilizado para medir cloro libre y cloro total en las muestras (agua cruda y agua potable) y controles (agua cruda y agua potable). Foto tomada por Zulymar Vélez.

1- Cloro libre

Antes de cada análisis, se observó la celda a utilizar para asegurar que la misma no tuviera ralladuras que pudieran interferir en el análisis. Previo a cada análisis se enjuagó la celda y tapa tres veces con el agua de muestra. Se llenó la celda de muestra (vidrio) con el agua a analizar hasta la marca de 10 mL y se tapó (este era el blanco). Se limpió la celda y se colocó en el agujero del colorímetro con el diamante apuntando de frente al analizador.

Se puso la tapa del instrumento y se presionó la tecla cero (color azul). Apareció, 0.00 en la pantalla del instrumento. Luego se sacó la tapa del instrumento y se sacó la celda con agua de muestra. Se preparó otra celda de muestra con agua a analizar, llenándola hasta la marca de 10 mL y se le añadió una almohadilla de DPD Free. Se tapó la celda y se movió suavemente durante 20 segundos aproximadamente. Cuando el cloro estaba presente en la muestra, se observó que la muestra se tornó color rosa luego de añadir la almohadilla. La intensidad de este dependió de la concentración presente de cloro. Se limpió la celda, se puso en el orificio del colorímetro con el diamante apuntando de frente al analizador y se colocó la tapa al instrumento. Se presionó la tecla de lectura (color verde) para obtener el resultado antes del minuto de haberle añadido la almohadilla con reactivo. La lectura fue documentada en mg/L Cl₂. Se descartó la muestra y se lavó la celda de muestra.

2- Cloro total

Para esta prueba se repitieron los mismos pasos que la prueba de cloro libre, pero utilizando una almohadilla DPD Total y el tiempo de espera antes de presionar la tecla de lectura fue de tres a seis minutos luego de añadirle la almohadilla con reactivo. Para esto se utilizó un cronómetro.

D. pH y temperatura- Método: Electrodo

Precauciones que se tomaron en cuenta antes del análisis (Hach Company, 2017).

- Se aseguro que el metro de pH estuviera calibrado.
- Se analizaron las muestras a la brevedad posible.
- Se colectaron las muestras en envases de cristal o plástico limpios.

Se realizó el método electrodo para el análisis de pH a muestras de agua utilizando el metro de pH HQ40d de la compañía Hach (ver figura 12) y los pasos realizados para la calibración y el análisis de pH en agua utilizando el método de electrodo del manual de procedimiento del instrumento (HQ40d) de la compañía Hach.



Figura 12. Instrumento colorímetro portátil “Pocket II” de la marca HACH utilizado para medir cloro libre y cloro total en las muestras (agua cruda y agua potable) y controles (agua cruda y agua potable). Foto tomada por Zullymar Vélez.

Verificación de calibración del metro de pH

Se colocaron en tres envases limpios soluciones de buffer de pH 7 (color amarillo), 10 (color azul) y 4 (color rojo) respectivamente. Se presionó el botón para la opción de calibración en el instrumento (tecla color azul). Se enjuagó la sonda del electrodo con agua destilada y se secó. Se colocó la sonda en un envase con una de las soluciones de buffer sin permitir toque fondo ni paredes del envase. Se presionó la tecla de medición (tecla

verde) y se esperó que apareciera un candado en la parte superior izquierda de la pantalla del instrumento. Esto significó que la medida se estabilizó y que el resultado era el mostrado en la pantalla. Se retiró la sonda del envase con la solución buffer, se limpió la sonda con un poco de agua destilada y se secó. Se procedió a tomar las medidas de las dos soluciones de buffer restantes. Luego que se tomaran las mediciones de las tres soluciones de buffer, se oprimió la tecla con la opción finalizar. Se anotaron los resultados de las mediciones de los tres buffers (7,10 y 4), las temperaturas de cada uno de estos y la pendiente dada por el instrumento. Se oprimió la tecla guardar en el instrumento. Se corroboró que el rango de la pendiente fluctuara de $-58 \text{ mV } (\pm 3)$ a 25°C .

Análisis de muestras

Se enjuagó la sonda con agua destilada y se secó. Se colocó la sonda en el recipiente que contenía la muestra de agua sin que tocara el fondo ni paredes del recipiente. Se movió la sonda lentamente en la muestra para eliminar posibles burbujas de aire en la muestra y punta de la sonda. Luego se sujetó la sonda manteniéndola inmóvil y se presionó la tecla de lectura del instrumento (tecla verde). El resultado de pH y temperatura final se mostraba cuando aparecía un candado a la izquierda alta en la pantalla del instrumento. Esto ocurría luego de que la medida se estabilizara. Se retiró la sonda del agua de muestra, se enjuagó con agua destilada y se secó.

E. Turbidez- Método: Nefelométrico.

Precauciones que se tomaron en cuenta antes del análisis (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017)

- Se verifico la calibración del turbidímetro por día, antes de analizar las muestras.

- Se inspeccionaron que las celdas de muestra no tuvieran ralladuras. De alguna tener, se usó otra.
- Se limpiaron las celdas varias veces con agua destilada y se dejaron secar a temperatura ambiente.
- Se manejaron las celdas por el tope siempre para evitar ensuciarlas con los dedos.
- Se realizó la prueba tan rápido como fue posible para obtener una medida más precisa y exacta.
- De la muestra presentar burbujas de aire, se esperó que desaparecieran por un tiempo no prologando y se movió suavemente la muestra antes de llenar la celda con agua a analizar.
- De la muestra estar empañada debido a humedad, se limpió la celda completamente antes de ponerla en el instrumento para analizarla.

Se utilizó el turbidímetro Hach 2100N (ver figura 13) y el procedimiento establecido por la compañía Hach en el Manual de Instrucciones del Turbidímetro de Laboratorio modelo 2100N (1999) para la verificación de calibración del turbidímetro y para el análisis de muestras de agua por turbidez. Las unidades de las mediciones de turbidez son en NTU (Unidades nefelométricas de turbidez). En todo momento el modo de operación del instrumento fue en Rango automático, “Ratio ON” y “Signal AVG ON”.



Figura 13. Turbidímetro de la marca HACH 2100N utilizado para medir turbidez en las muestras (agua cruda y agua potable) y controles (agua cruda y agua potable). Foto tomada por Zullymar Vélez.

Verificación de calibración con los estándares secundarios de turbidez Gelex:

Se realizó una verificación de calibración del turbidímetro Hach 2100N por día y muestreo, antes de analizar las muestras utilizando los estándares secundarios de turbidez Gelex.

Se verificó que la calibración con estándares primarios de formacina estuvieran vigente. Se verificó que el instrumento estuviera en modo de rango automático, “Ratio on” y medida en NTU. Se limpió cada estándar y se colocó en el compartimiento del instrumento con el triángulo invertido de frente, alineado a la marca del compartimiento del instrumento. Se cerró la tapa del compartimiento del equipo y se presionó la tecla “enter” para obtener el valor de la medida. Se removió el estándar del instrumento. Se repitió el mismo procedimiento para los cuatro estándares secundarios en orden ascendente. Se guardaron los estándares a temperatura ambiente.

Análisis de muestras:

Se llenó la celda a analizar hasta la línea con aproximadamente 30 mL de muestra y se tapó. Se aguantó la celda por la tapa y se limpió la celda para remover agua y marcas de dedos. Se aseguró el filtro estuviera colocado en el lugar correspondiente. Se colocó la celda con la muestra en el compartimiento del instrumento con el triángulo invertido de frente, alineado con la marca del compartimiento del instrumento. Se cerró la tapa del compartimiento del instrumento para obtener el resultado de la medición. Se esperó hasta que el instrumento estabilizara la medición de la muestra en aproximadamente 14 segundos. Se anotó el resultado. Se removi6 la celda con la muestra del instrumento, se descartó la muestra por el fregadero del laboratorio y se limpió la celda con agua destilada.

RESULTADOS

Se colectó agua cruda y agua tratada de la planta de tratamiento de agua potable, para realizarle distintos análisis físico-químicos y filtrarlas por una membrana compuesta de capa fina mediante el proceso de osmosis directa en tres ocasiones. El agua colectada se dividió en dos grupos: muestras (Agua cruda (C) y agua potable (P)) y controles (Control de agua cruda (CC) y control de agua potable (CP)). Las muestras C y P fueron las únicas que se filtraron por una membrana compuesta de capa fina mediante osmosis directa, pero a todas se le realizó análisis físico-químicos antes (pre) y después (post) de que las muestras C y P fueran filtradas por la membrana. Los CC y CP no se filtraron, y se utilizaron como controles para evidenciar cambios en los parámetros estudiados por razones ajenas al proceso de filtración por membrana. Los tres muestreos fueron realizados bisemanalmente los lunes, intercalando esos días.

A cada grupo se le realizaron los análisis físico-químicos en el laboratorio de la planta de tratamiento, al momento de la colecta de muestra, estos corresponderían a las características pretratamiento (pre). Las muestras sobrantes se almacenaron y transportaron hasta el laboratorio de Química de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, donde se le realizó la filtración por membrana por osmosis directa. Las muestras filtradas (soluciones extractoras diluidas con el agua de las muestras) se almacenaron y transportaron junto con los controles nuevamente al laboratorio de la planta de tratamiento para realizarle los análisis físico-químicos (post). Los análisis físico-químicos y la filtración por membrana se hicieron por triplicado tanto para el agua cruda como para el agua potable. Los controles (CC y CP) acompañaron en todo momento a las muestras, pero

no fueron filtradas por membrana. A los controles se les realizó también los análisis físico-químicos por triplicado.

Los resultados presentados en esta sección son los promedios de tres lecturas, para las tres corridas de muestras. Los parámetros físico-químicos medidos fueron: alcalinidad, amoníaco, cloro libre, cloro total, pH, y turbidez. La concentración de amoníaco se mantuvo por debajo del límite de detección del método en todas las muestras, por lo que no se discute este parámetro en esta investigación.

Alcalinidad

En la figura 14 se muestra los resultados de alcalinidad en muestras de agua cruda y controles de agua cruda. El promedio de la alcalinidad de las muestras disminuyó de 100 ppm a 14 ppm después de filtrarla con la membrana y mientras que el promedio de los controles se mantuvo entre 100 ppm (pre) y 103 ppm(post).

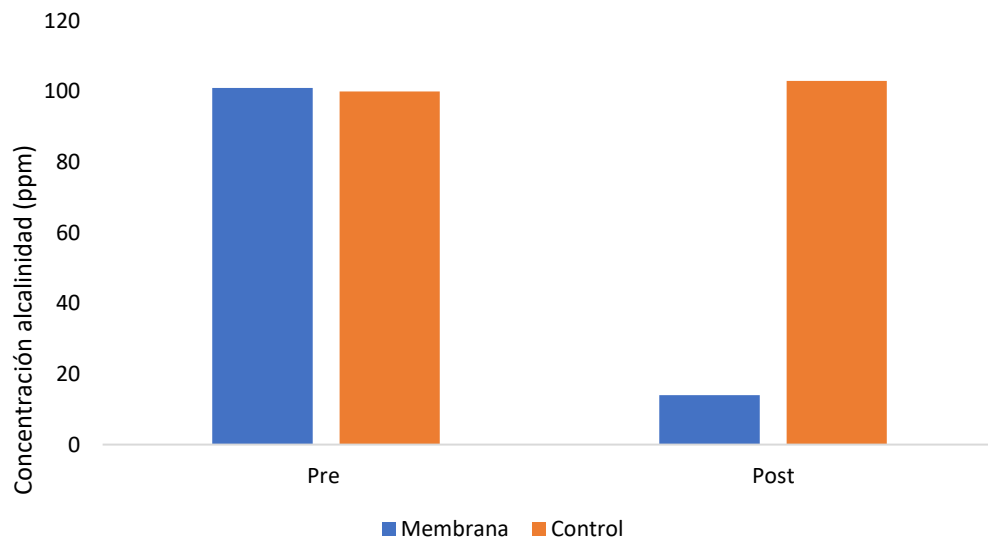


Figura 14. Promedio de alcalinidad en muestras de agua cruda, (antes y (pre) después (post) de filtrarla por la membrana) y controles de agua cruda (no filtradas por la membrana).

En la figura 15 se muestra el promedio de alcalinidad en muestras de agua potable y controles de agua potable. La alcalinidad promedio para muestras de agua potable disminuyó de 97 ppm a 17 ppm después de la filtración, mientras que la concentración promedio de los controles permaneció en 92 ppm.

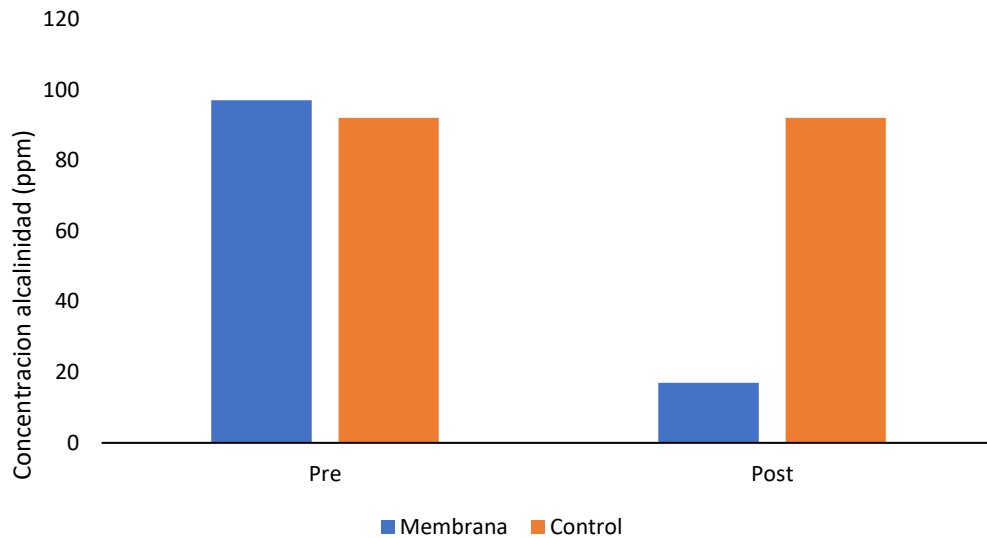


Figura 15. Promedio de alcalinidad en muestras de agua potable (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y controles de agua potable (no filtradas por la membrana).

Se obtuvo una disminución de alcalinidad promedio de 86% para muestras de agua cruda y de 83% para muestras de agua potable mediante el uso de membrana (ver figura 16).

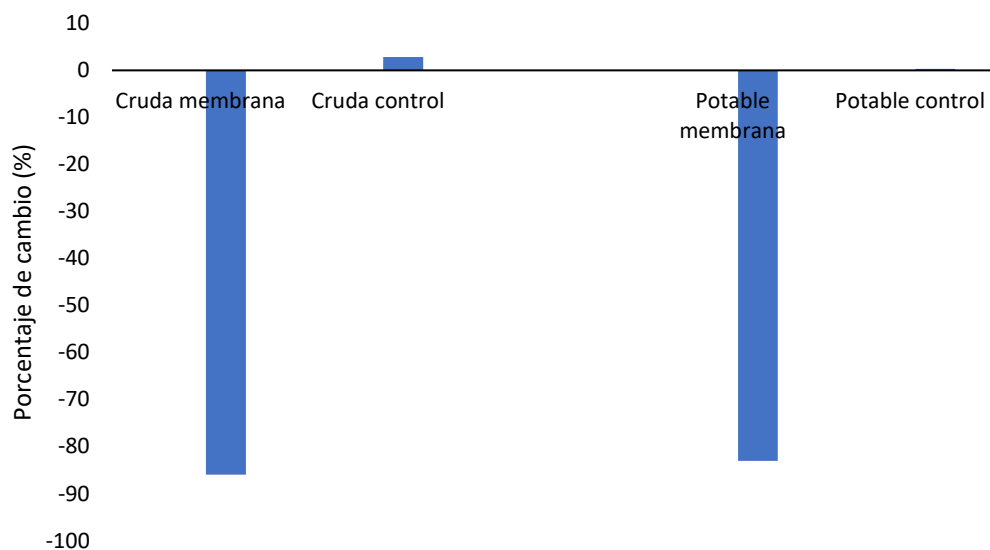


Figura 16. Porcentaje de cambio de la alcalinidad en muestras de agua cruda, agua potable, controles de agua cruda y controles de agua potable.

Cloro libre

En la figura 17 se muestra el promedio de la concentración de cloro libre (mg/L) en muestras de agua cruda y los controles de agua cruda. El promedio de las muestras de agua cruda fue de 0.03 mg/L (pre) y 0.02 mg/L (post) filtradas por la membrana, mientras que en los controles fue 0.04 mg/L (pre) y 0.03 mg/L (post) no filtradas por la membrana. El agua cruda no se le había añadido cloro en la planta de tratamiento.

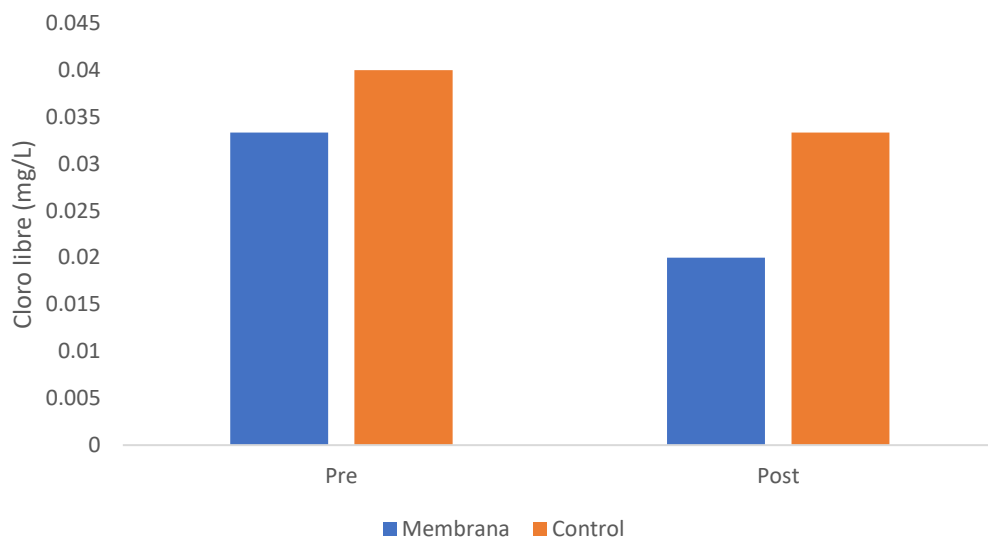


Figura 17. Promedio de la concentración de cloro libre (mg/L) en muestras de agua cruda (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua cruda (no filtradas por la membrana).

En la figura 18 se muestra el promedio de la concentración de cloro libre (mg/L) en muestras de agua potable y los controles de agua potable. En resumen, se observó cambio en la concentración de cloro libre en las muestras de agua potable que fueron filtradas por membrana. En las muestras de agua potable, el cloro libre disminuyó de 1.9 mg/L (pre) a 0.03 mg/L (post) en promedio. En los controles, la concentración promedio disminuyó de 1.9 mg/L (pre) a 1.3 mg/L (post) en promedio, posiblemente debido a pérdida durante el transporte y manejo.

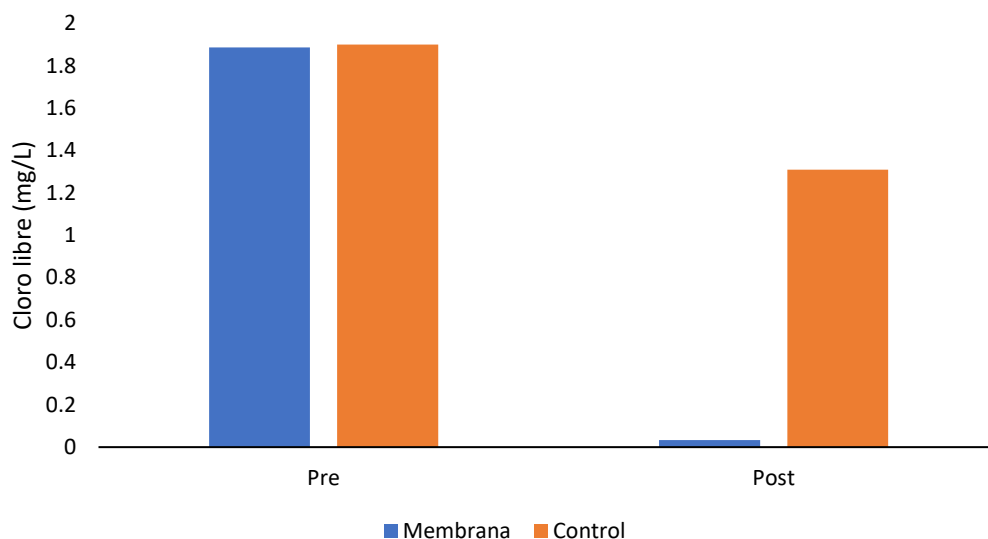


Figura 18. Promedio de la concentración de cloro libre (mg/L) en muestras de agua potable (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua potable (no filtradas por la membrana).

Se obtuvo un 98% de reducción de cloro libre en las muestras de agua potable filtradas con la membrana, mientras que en los controles de potable se obtuvo un 31% de reducción de cloro de manera natural. (Ver figura 19).

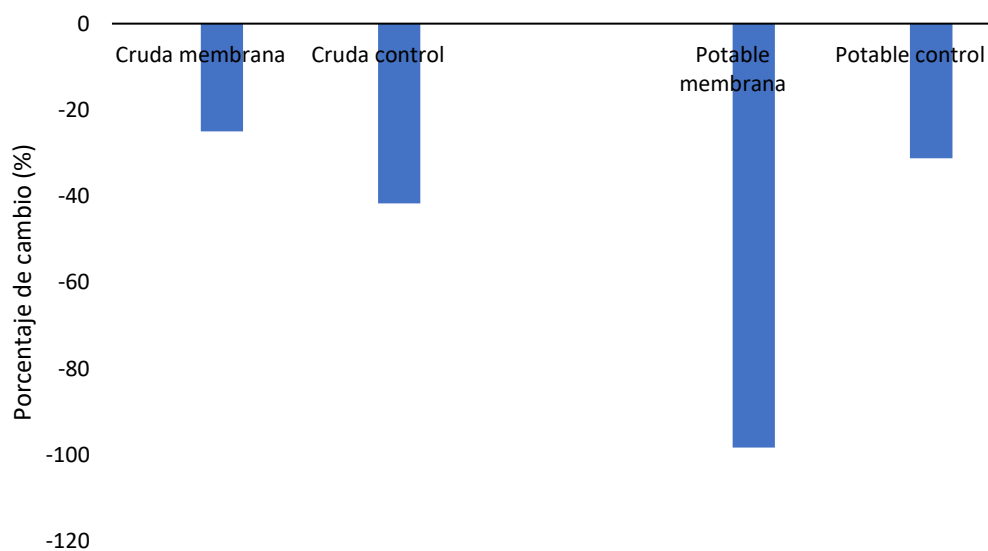


Figura 19. Porcentaje de cambio de cloro libre en las muestras de agua cruda, potable y los controles.

Cloro total

La figura 20 muestra el promedio de cloro total (mg/L) en muestras de agua cruda y controles. Las lecturas promedio no sobrepasaron de 0.09 mg/L.

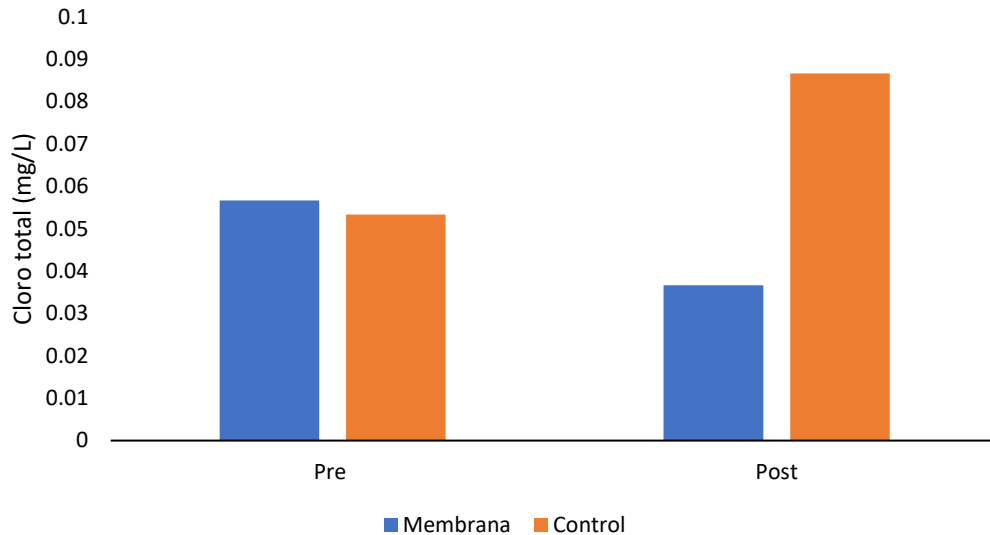


Figura 20. Promedio de la concentración de cloro total(mg/L) en muestras de agua cruda (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua cruda (no filtradas por la membrana).

En la figura 21 se muestra el comportamiento promedio de la concentración de cloro total (mg/L) en muestras de agua potable y controles de agua potable. Se observó cambio en la concentración de cloro libre en las muestras de agua potable que fueron filtradas por membrana. En las muestras de agua potable, el cloro libre disminuyó de 1.9 mg/L (pre) a 0.04 mg/L (post) en promedio. En los controles, la concentración promedio disminuyó de 1.9mg/L (pre) a 1.4mg/L (post) en promedio.

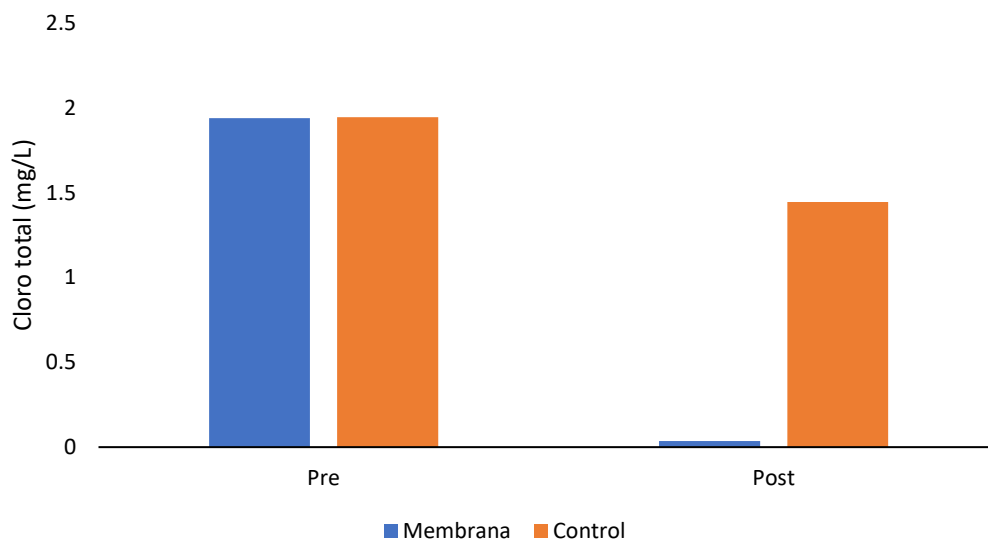


Figura 21. Promedio de la concentración de cloro total (mg/L) en muestras de agua potable (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua potable (no filtradas por la membrana).

Se obtuvo un 98% de reducción de cloro libre en las muestras de agua potable filtradas con la membrana, mientras que en los controles de agua potable se obtuvo un 26% de reducción de cloro de manera natural. (Ver figura 22).

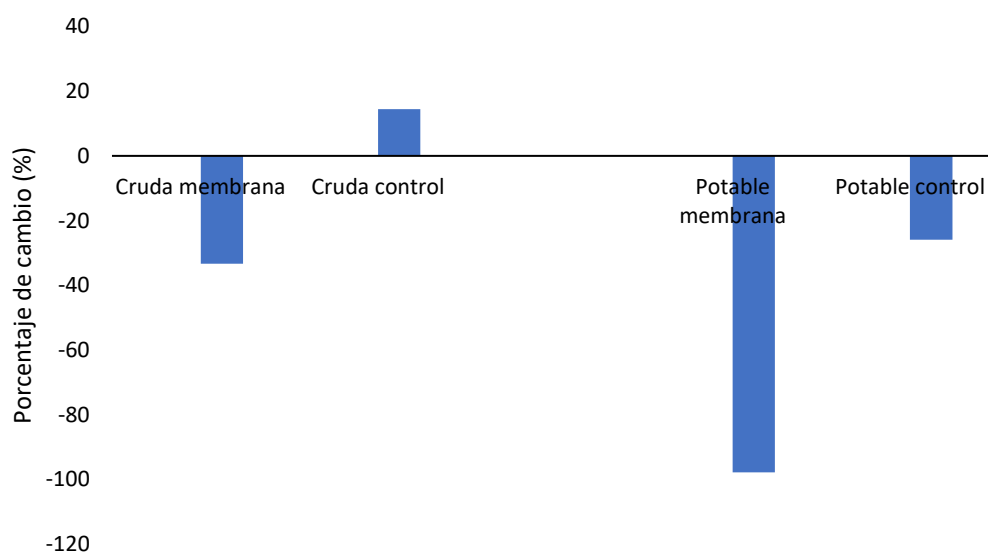


Figura 22. Porcentaje de cambio de cloro libre en las muestras de agua cruda, potable y los controles.

pH

La figura 23 muestra el promedio del pH en las muestras de agua cruda y los controles de agua cruda. El pH promedio obtenido en muestras de agua cruda fue de 7.79 para pre-membrana y 7.77 para post-membrana, mientras que, en los controles, las lecturas promedio fueron 7.77 (pre) y 8.16 (post).

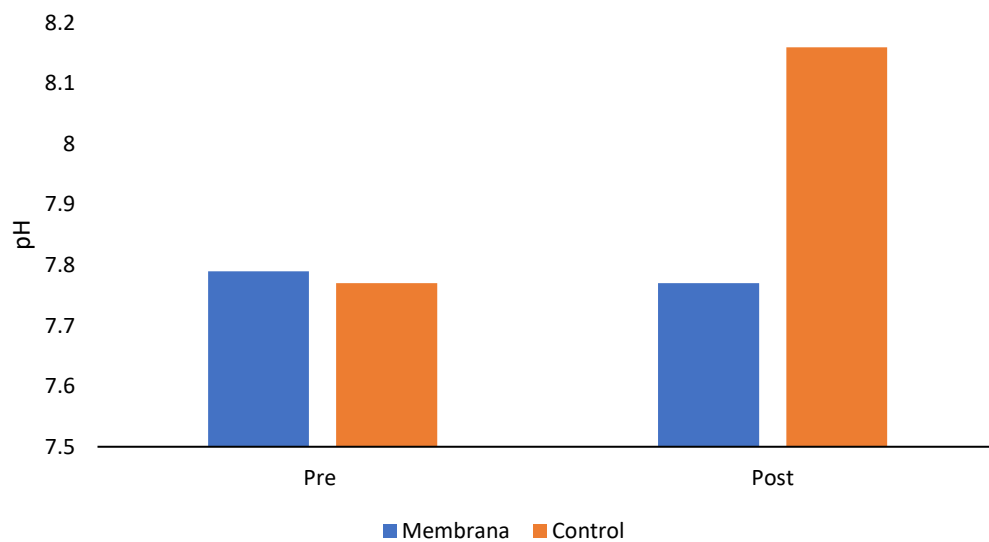


Figura 23. Promedio de pH en muestras de agua cruda (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua cruda (no filtradas por la membrana).

En la figura 24 se muestra el promedio del pH en muestras de agua potable y controles de agua potable. Las lecturas promedio de pH fueron de 7.43 (pre) a 7.55 (post) en muestras de agua potable y 7.49 (pre) a 7.90 (post) en los controles.

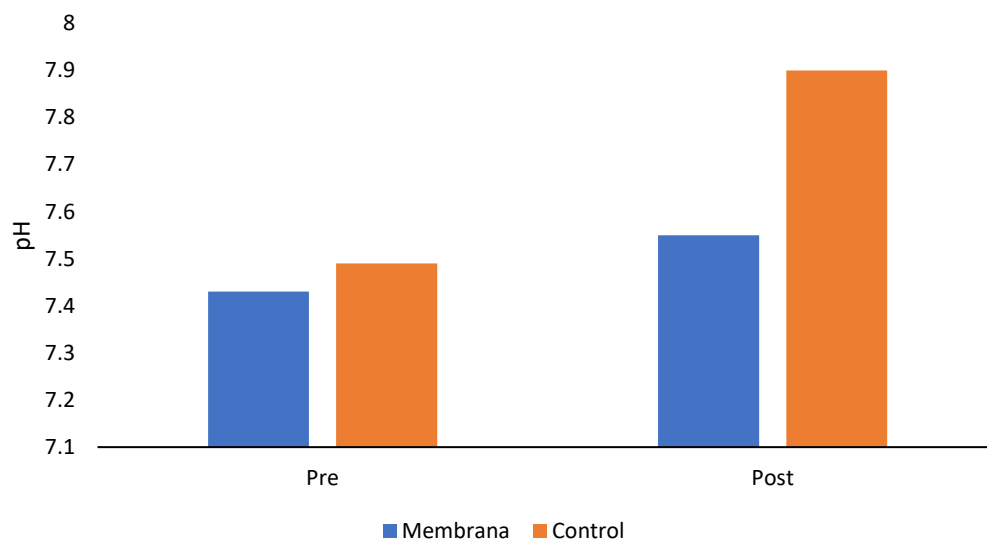


Figura 24. Promedio de pH en muestras de agua potable (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua potable (no filtradas por la membrana).

En la figura 25 se muestra el porcentaje de cambio del pH en las muestras y los controles.

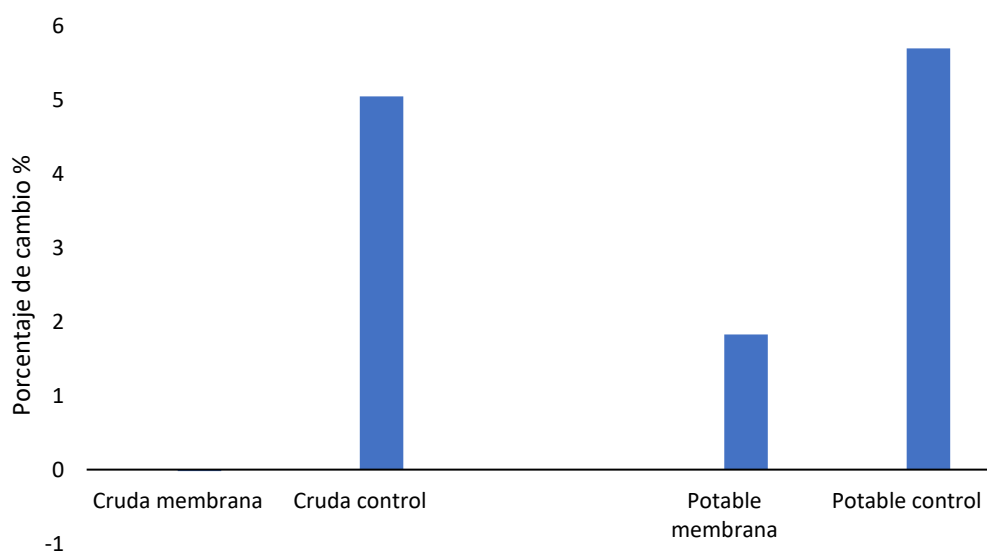


Figura 25. Porcentaje de cambio del pH de las muestras de agua cruda, agua potable y controles.

Turbidez

En la figura 26 se muestra el promedio de la turbidez (NTU) en las muestras de agua cruda y los controles de agua cruda. Se obtuvo una disminución promedio de turbidez de 16.3 NTU a 0.17 NTU en las muestras de agua cruda filtradas por membrana.

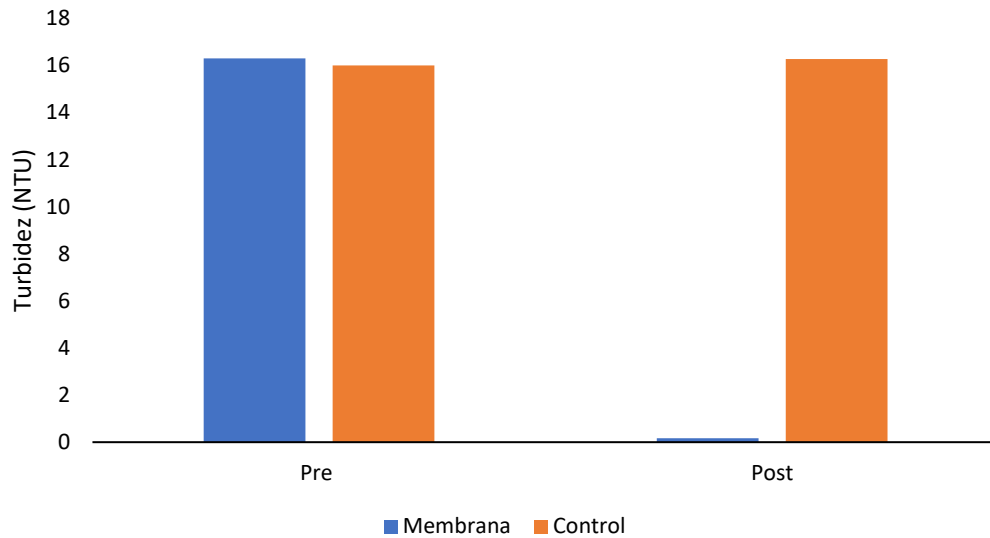


Figura 26. Promedio de la turbidez (NTU) en muestras de agua cruda (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua potable (no filtradas por la membrana).

En la figura 27 se muestra el promedio de la de turbidez (NTU) en muestras de agua potable y controles de agua potable. La turbidez promedio en las muestras de agua potable cambió de 0.18 NTU a 0.23 NTU luego de tratada con la membrana, mientras que en los controles la turbidez promedio disminuyó de 0.18 NTU a 0.14 NTU.

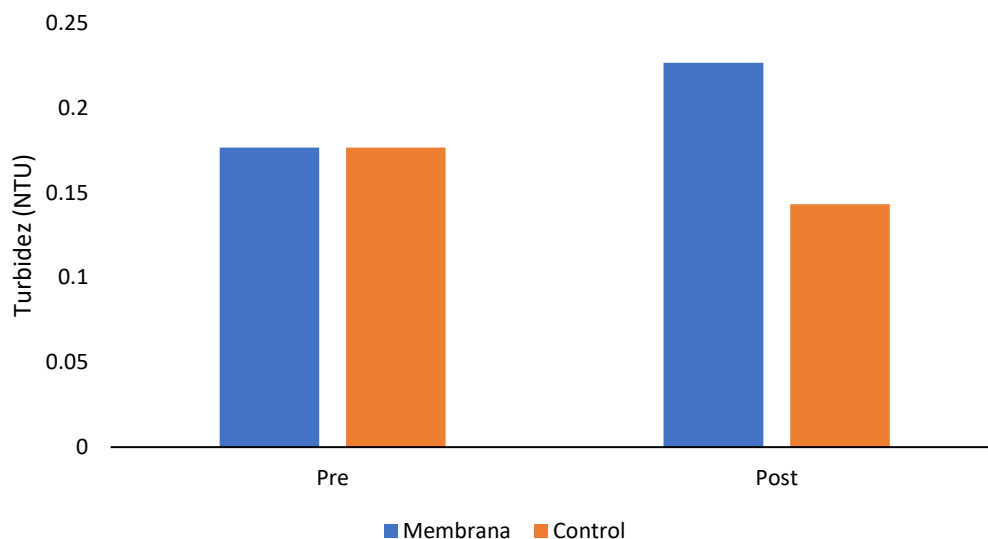


Figura 27. Promedio de turbidez (NTU) en muestras de agua potable (antes (pre) y después (post) de filtrarlas por la membrana) y los controles de agua potable (no filtradas por la membrana).

Se obtuvo un 99% de disminución de turbidez en muestras de agua cruda filtradas por la membrana (Ver figura 28).

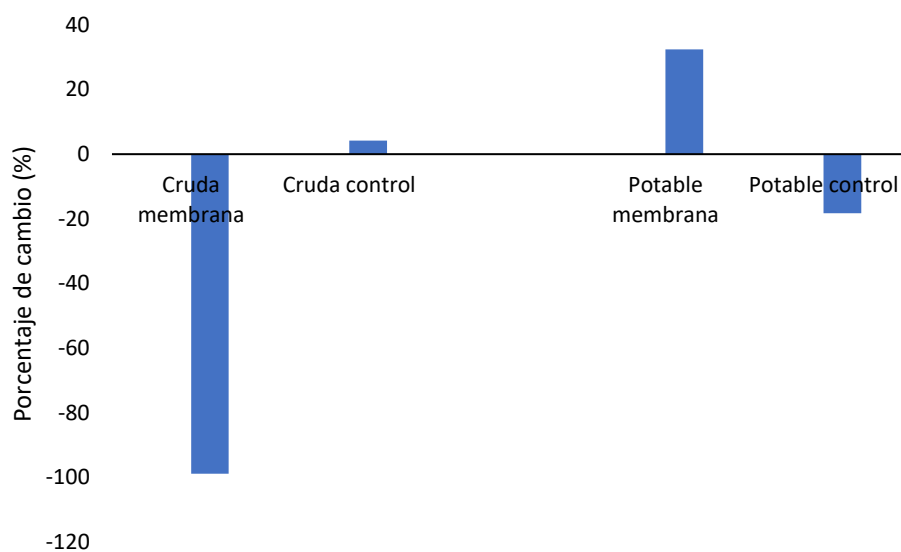


Figura 28. Porcentaje de cambio de la turbidez en las muestras de agua cruda, potable y los controles.

Se obtuvo un LMH (relación de flujo con superficie de membrana) promedio de 27 tanto para agua cruda como para agua potable, remoción de turbidez de agua cruda (99%), remoción de cloro libre en agua potable (98%), cloro total en agua potable (98%) y alcalinidad en agua cruda (86%) y agua potable (83%) (Ver apéndice 1).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Comparación estadística de pruebas químicas realizados en la planta de estudio.

Se realizó la prueba “t student” pareada para comparar cada parámetro estudiado entre el agua cruda (antes (pre) y después (post) de filtrarlos por la membrana (solución extractora diluida con el agua cruda filtrada)) y su control (antes (pre) y después (post) no filtrados por la membrana), así como para el agua potable antes (pre) y después (post) de filtrarlos por la membrana (solución extractora diluida con el agua potable filtrada)) y su control (antes (pre) y después (post) no filtrados por la membrana) con un 95% de confianza y evaluar y comparar cada parámetro estudiado. Se realizó la prueba F para calcular diferencia entre varianzas de diferentes muestras. En este estudio, primero se evaluó diferencia entre las varianzas del porcentaje de cambio entre muestras de agua cruda vs controles de agua cruda y muestras de agua potable vs controles de agua potable para cada parámetro y con el resultado de esto, se realizó prueba estadística “t student” asumiendo iguales varianzas o asumiendo diferentes varianzas (dependiendo el resultado obtenido en la diferencia de varianzas) para comparar los porcentajes de cambio entre muestras de agua cruda vs controles de agua cruda y muestras de agua potable vs controles de agua potable para cada parámetro.

Alcalinidad

a. Agua Cruda (muestra vs control)

La alcalinidad promedio de las muestras se redujo, de 101ppm (pre) a 14ppm (post) por el uso de la membrana, mientras que la concentración promedio de los controles fueron de 100ppm (pre) y 103ppm(post). Al comparar la alcalinidad de los

controles, (pre y post) estas fueron estadísticamente iguales, indicando que el transporte y manipulación no afectó este parámetro. Al comparar las soluciones muestras, antes y después de filtradas, los resultados fueron estadísticamente diferente, demostrando que hubo remoción de alcalinidad en las muestras de agua cruda. La remoción de alcalinidad en las muestras pudo deberse a la selectividad de la membrana. Los controles no sufrieron cambios significativos.

b. Agua Potable (muestra vs control)

La alcalinidad promedio para muestras de agua potable fue reducida de 97ppm (pre) a 17ppm (post), mientras que la concentración promedio de los controles permaneció en 92ppm, tanto para pre como para post. Los resultados fueron estadísticamente diferentes entre las muestras y estadísticamente iguales en los controles, por lo que la filtración por membrana removi6 alcalinidad en solución extractora diluida con la muestra de agua potable, demostrando selectividad en la membrana.

c. Filtración por membrana: Cruda vs Potable (% cambio)

Los resultados en el porcentaje de cambio fueron estadísticamente diferentes tanto para las DS diluidas de muestras de agua cruda como para las de agua potable. La filtración por membrana tuvo efecto en el parámetro de alcalinidad debido a que obtuvo una disminución de alcalinidad de 86% para muestras de agua cruda y de 83% para muestras de agua potable. Para uso en tratamiento de agua potable, se podría utilizar un método o un compuesto químico que aumente y/o regule la

alcalinidad del agua en el tratamiento antes o después de la filtración por membrana como lo es la cal (AAA, Sin fecha) ya que la baja alcalinidad del agua se asocia con la disminución de pH en el agua (EPA, 2001).

Cloro libre

a. Cruda (muestra vs control)

La concentración promedio de cloro libre para muestras de agua cruda fue de 0.03mg/L (pre) y 0.02mg/L (post), mientras que la concentración promedio de los controles fue de 0.04 mg/L (pre) y 0.03mg/L (post). Los resultados fueron estadísticamente iguales tanto para las muestras como para los controles de agua cruda. En la filtración por membrana para el agua cruda no se observó diferencia estadística en los resultados de cloro libre, antes y después del tratamiento con la membrana, posiblemente porque estas muestras presentaron baja concentración de cloro libre (cerca del límite de detección del método). El agua cruda no debe reflejar cloro libre debido a que es agua que no ha sido tratada, sin embargo, los resultados que reflejan presencia cloro libre en muestras de agua cruda y controles de agua cruda pudieron deberse a la presencia de cloro en el agua cruda por contaminación del agua mediante descargas o escorrentías contaminadas en el canal de riego, ya que el agua cruda cursa su trayectoria desde el lago Luchetti en Yauco, a través de un canal de riego que también tiene uso agrícola antes de llegar la planta en estudio. Además, que el canal de riego es accesible a las comunidades en algunas áreas del trayecto.

b. Agua Potable (muestra vs control)

La concentración promedio de cloro libre para muestras de agua potable fue reducida de 1.89mg/L (pre) a 0.03mg/L (post), mientras que la concentración promedio de los controles fue de 1.9 mg/L (pre) a 1.31mg/L (post). Los resultados fueron estadísticamente diferentes tanto para las muestras como para los controles de agua potable. La filtración por membrana disminuyó el cloro libre presente en las muestras de agua potable en las soluciones extractoras diluidas con agua potable demostrando rechazo de cloro libre por parte de la membrana y a su vez demostrando selectividad en la membrana. La disminución de cloro libre en los controles se debe posiblemente a la degradación natural de este durante el almacenaje, transporte y manejo. El cloro libre es reactivo, por lo que naturalmente va disminuyendo hasta desaparecer (EPA, 2001), si no se mantiene una inyección constante.

c. Filtración por membrana: Cruda vs Potable (% cambio)

El porcentaje de cambio en cloro libre al comparar las muestras de agua cruda con el control fueron estadísticamente iguales mientras que los porcentaje de cambio de cloro libre al comparar las muestras de agua potable con el control fueron estadísticamente diferentes. Se obtuvo un 98% de remoción de cloro libre con el uso de la membrana en las soluciones extractoras diluidas de las muestras de agua potable y una disminución de 31% en los controles de agua potable, posiblemente debido a pérdida natural de cloro por su degradación durante el almacenaje, transporte y manejo. El obtener un 98% de remoción de cloro libre en las soluciones

extractoras diluidas demuestra la selectividad de la membrana para este parámetro a través del rechazo de este y la resistencia al cloro residual porque el proceso ocurrió sin detenerse.

Cloro total

a. Agua Cruda (muestra vs control)

La concentración promedio de cloro total para muestras de agua cruda fue de 0.06mg/L (pre) y 0.04mg/L (post), mientras que la concentración promedio de los controles fue de 0.05 mg/L (pre) y 0.09mg/L (post). Los resultados fueron estadísticamente iguales tanto para las muestras como para los controles de agua cruda. En la filtración por membrana para el agua cruda no se observó diferencia estadística en los resultados de cloro total, antes y después del tratamiento con la membrana, posiblemente porque estas muestras presentaron baja concentración de cloro total para presentar una diferencia notoria. Los resultados que reflejan presencia cloro total en muestras de agua cruda y controles de agua cruda pudieron deberse a la presencia de cloro en el agua cruda por contaminación del agua mediante descargas o escorrentías contaminadas en el canal de riego, ya que el agua cruda cursa su trayectoria desde el lago Luchetti en Yauco, a través de un canal de riego que también tiene uso agrícola antes de llegar la planta en estudio. Además, que el canal de riego es accesible a las comunidades en algunas áreas del trayecto.

b. Agua Potable (muestra vs control)

La concentración promedio de cloro total para muestras de agua potable fue reducida de 1.94mg/L (pre) a 0.04mg/L (post), mientras que la concentración

promedio de los controles fue de 1.95 mg/L (pre) a 1.45mg/L (post). Los resultados fueron estadísticamente diferentes tanto para las muestras como para los controles de agua potable. La filtración por membrana disminuyó el cloro total en las soluciones extractoras diluidas con el agua de las muestras de agua potable, demostrando rechazo y selectividad de parte de la membrana. La membrana también demostró ser resistente al cloro total ya que el proceso de filtración por membrana ocurrió sin detenerse. La disminución de cloro total en los controles posiblemente se debe a la degradación natural de este debido al almacenaje, manejo y transporte.

c. Filtración por membrana: Cruda vs Potable (% cambio)

El porcentaje de cambio de cloro total en las muestras de agua cruda fue estadísticamente igual mientras que los resultados de las muestras de agua potable fueron estadísticamente diferentes al comparar pre y post filtración con membrana. Se obtuvo un 98% de remoción de cloro total con membrana en muestras de agua potable y una disminución de 26% en los controles de agua potable. Con esta disminución de 98% de cloro total en las soluciones extractoras diluidas con agua potable de muestra, la membrana rechazó cloro total, demostrando ser selectiva y resistente para ese parámetro. La disminución en los controles de agua potable posiblemente es debido a la degradación natural del cloro en el agua y el manejo de muestras (almacenaje, transporte y análisis).

pH

a. Agua cruda (muestra vs control)

La concentración promedio del pH de las muestras de agua cruda fue de 7.79 (pre) y 7.77 (post) por el uso de membrana y la concentración promedio de los controles fue de 7.77 (pre) y 8.16 (post). Los resultados fueron estadísticamente iguales tanto para las muestras como los controles. Esto demuestra que la membrana no alteró el pH de las soluciones del agua cruda.

b. Agua Potable (muestra vs control)

La concentración promedio del pH de las muestras fue de 7.43 (pre) y 7.55 (post) por el uso de la membrana y la concentración promedio de los controles fue de 7.49 (pre) y 7.90 (post). Los resultados fueron estadísticamente iguales tanto para las muestras como los controles demostrando que la membrana no alteró el pH de las soluciones de agua potable.

c. Filtración por membrana: Cruda vs Potable (% cambio)

Los resultados del porcentaje de cambio obtenidos indican ser estadísticamente iguales tanto para agua cruda como para agua potable por lo que significa que la membrana no alteró el pH de las soluciones de las muestras.

Turbidez

a. Agua Cruda (muestra vs control)

La concentración promedio de la turbidez de las muestras se redujo de 16.3 NTU (pre) a 0.17 NTU (post) por el uso de la membrana, demostrando que la membrana

disminuyó la turbidez significativamente. Este resultado demostró la selectividad de la membrana para este parámetro. El resultado obtenido en las soluciones extractoras diluidas con muestra de agua cruda, estuvieron en cumplimiento con los estándares de calidad de agua, siendo 0.30 NTU el MCL establecido por la EPA para turbidez en agua potable. La concentración promedio de los controles fue de 16 NTU (pre) y 16.3 NTU (post). Los resultados obtenidos resultaron estadísticamente iguales para muestras de agua cruda y para los controles. Los resultados en los controles son esperados debido a que el agua cruda no tiene añadido productos químicos como los coagulantes, floculantes o cloro (desinfección) reaccionen con el agua y los componentes presentes en ella que cambie o altere sus condiciones como para el agua potable, por lo que no se espera se observen cambios significativos en turbidez.

b. Agua Potable (muestra vs control)

La turbidez promedio de las muestras fue de 0.18 NTU (pre) y 0.23 NTU (post) por el uso de la membrana, mientras que la turbidez promedio de los controles fue de 0.18 NTU antes (pre) y 0.14 NTU después (post). Los resultados obtenidos fueron estadísticamente iguales para muestras de agua potable y los controles. Se observa un leve aumento en la turbidez de agua potable luego del tratamiento con la membrana, que puede ser debido a la concentración baja de este parámetro, no obstante, el resultado promedio estuvo por debajo de 0.30 NTU por lo que los mismos cumplen con nivel de turbidez permitida en agua potable según los establecido por las leyes estatales y federales.

c. Filtración por membrana: Cruda vs Potable (% cambio)

En el porcentaje de cambio, la membrana redujo la turbidez en agua cruda a un 99% mientras que en el agua potable el porcentaje de cambio reflejó un aumento de 32%. La membrana redujo la turbidez de agua cruda significativamente en las soluciones extractoras diluidas con muestras de agua cruda. El porcentaje de cambio fue estadísticamente diferente para agua cruda debido a la reducción significativa de turbidez en agua cruda y estadísticamente igual para agua potable debido a la proximidad de las lecturas de turbidez en el agua potable.

Se observó tendencias de resultados en los parámetros físico-químicos determinados para las muestras de agua cruda y las muestras de agua tratada filtradas por membrana de capa fina. El efecto que tuvo la filtración de membrana en las muestras de agua cruda fue disminución de turbidez y la alcalinidad, mientras que en las muestras de agua potable la membrana logró remoción de cloro libre, cloro total y la alcalinidad promedio, sin afectar el pH demostrando selectividad en estos parámetros.

En este estudio también se contempló evaluar el efecto de la filtración por membrana sobre el contenido de amoníaco en las muestras, sin embargo, no se detectó (el nivel de este parámetro fue siempre por debajo del nivel detectado por el método), por lo que no se analizó ni se tomó en consideración.

B. Utilización de membrana mediante osmosis directa para purificación de agua cruda y potable.

La membrana utilizada en este estudio demostró ser eficiente en remoción de turbidez de agua cruda (99%), remoción de cloro libre en agua potable (98%), cloro total en agua potable (98%) y alcalinidad en agua cruda (86%) y agua potable (83%). Estos resultados son alentadores si se desean remover estos componentes, sin embargo, dependiendo del uso del agua resultante, se debe evaluar la utilidad de la remoción de la alcalinidad en agua, ya que una alcalinidad baja puede resultar en baja capacidad de neutralizar ácidos y acidificación del agua. Los resultados obtenidos son comparables con estudios previos, e incluso esta membrana logró remover más cloro y turbidez que otras membranas reportadas previamente.

La membrana utilizada en este estudio demostró ser eficiente en remoción de turbidez de agua cruda, cloro libre y total de agua potable para tratamiento de agua cruda y potable. Esta membrana fue también utilizada por Cruz Tato (2017) para agua de planta de tratamiento de aguas residuales. Cruz Tato (2017) reportó que esta membrana, modificada con nanopartículas de metales, resultó ser eficiente y de mayor selectividad para tres diferentes soluciones alimentadoras, como lo fue el agua usada de una planta de tratamiento de aguas. Esto demuestra que esta membrana puede utilizarse para diferentes procesos de filtración por membrana (por ejemplo, en tratamiento de agua residuales y producción de agua potable) y que la misma puede adaptarse, mediante su modificación, para optimizar eficiencia en el tratamiento.

La membrana en este estudio disminuyó el contenido de cloro y turbidez del agua potable en mayor proporción que el reportado por Badea, et al (2012). Badea et al (2012) reportó el uso de una membrana hecha de poliamida, polisulfona, reforzada con poliéster, montada en un cilindro de fibra de vidrio en un sistema industrial de tratamiento de agua con osmosis inversa, para producir agua potable. Ellos reportaron una disminución de pH (19%-22%), cloro (73%-93%) y turbidez (97%-98%). Comparando estos resultados con los realizados en esta investigación, se puede observar que la filtración con osmosis inversa afectó el pH de las muestras, mientras que en este estudio el pH no resultó afectado luego de realizar la filtración de membrana por osmosis directa. Ellos indicaron que el pH en su estudio necesitaría ajuste debido a que no cumplió con los parámetros requeridos, luego de la filtración por membrana con osmosis inversa, lo que no ocurrió en este estudio.

En el estudio de (Laskawiec, Madej, Dudziak, & Wyczarska-Kokot, 2017) evaluaron la calidad del agua de retro lavado de dos localidades (una piscina de interior en una escuela y un jacuzzi en el interior de un parque acuático) midiendo turbidez y absorbancia de luz ultravioleta a 254 nm, con dos tipos de membrana (ultrafiltración- membrana PAN y nanofiltración- membrana TFC-PA) planas comerciales. Laskawiec et al (2017) reportaron que para ambos procesos de filtración por membrana y ambas membranas, la calidad del agua mejoró debido a la disminución significativa de turbidez y que la membrana TFC-PA fue más eficiente en remoción de estos compuestos. Al igual que el estudio de (Laskawiec, Madej, Dudziak, & Wyczarska-Kokot, 2017), la filtración por membrana TFC utilizando osmosis directa en este estudio, también disminuyó significativamente de turbidez en agua cruda, resultando en lecturas por debajo de 0.30 NTU (parámetro máximo permitido en turbidez de agua potable), por lo que se demuestra

que se puede utilizar en el tratamiento de agua para agua potable. La membrana utilizada en este estudio también presentó rasgos de resistencia al cloro residual en la muestra de agua potable, debido a que la filtración se completó sin que la membrana presentara señales de daño, mientras que el cloro fue reducido hasta un 98% tanto para agua cruda como para agua potable.

CONCLUSIONES

El propósito de este caso de estudio fue evaluar la eficiencia de una membrana compuesta de película fina (TFC) en la purificación de agua y remoción de contaminantes en el agua cruda (agua no tratada) y agua potable (agua tratada) de una planta de filtración de agua potable de la AAA (PF Betances), en Cabo Rojo, P.R. Para esto, se evaluaron diferentes parámetros físico-químicos de agua (alcalinidad, amoníaco, cloro residual libre, cloro residual total, pH, y turbidez) en las muestras, antes (pre) y después (post) de la corrida por membrana TFC, por osmosis directa. Este estudio demostró la eficiencia de la filtración por membrana TFC por osmosis directa para mejorar la calidad de agua potable, en los parámetros estudiados.

El cloro libre y cloro total, así como la alcalinidad total en el agua disminuyeron significativamente luego de la filtración con la membrana TFC. El pH de las muestras de agua cruda y de agua potable no se alteró, demostrando que la filtración por membrana no afectó el pH. La filtración por membrana TFC logró una disminución significativa de turbidez en agua cruda, resultando en lecturas por debajo de 0.30 NTU (parámetro máximo permitido en turbidez de agua potable). El contenido de amoníaco en las muestras no fue detectable, por lo que no se evaluó la eficiencia de la remoción de este componente.

La membrana utilizada en este estudio también presentó rasgos de resistencia al cloro residual y total del agua potable, debido a que el proceso no se detuvo por la presencia de cloro, resultando en una reducción de un 98% de cloro residual y total para muestras de agua potable, por lo que también la membrana puede utilizarse en otros procesos de tratamiento de agua, por ejemplo, en el tratamiento de agua usada o clorinada.

En cuanto a los parámetros medidos y analizados en el estudio, la alcalinidad obtuvo una reducción significativa luego del tratamiento de membrana tanto para agua cruda como para agua potable. Este parámetro no es regulado, pero si afecta directamente en el pH del agua. Un resultado de baja alcalinidad como lo sucedido en este estudio (remoción 86% alcalinidad en agua cruda y 83% remoción en alcalinidad en agua potable), puede ocasionar que el pH del agua disminuya y que el agua se vuelva ácida, incumpliendo el parámetro de pH. Según lo mencionado en el análisis de alcalinidad, para uso en tratamiento de agua potable, se podría utilizar un método o añadir un compuesto químico que aumente y/o regule la alcalinidad del agua en el tratamiento antes o después de la filtración por membrana como lo es la cal (AAA, Sin fecha). El estándar secundario de pH no se afectó y según los SMCL establecidos de 6.5-8.5 la membrana cumplió para este parámetro regulado tanto para agua cruda como para agua potable. Para los parámetros de cloro libre y cloro total en agua potable, la membrana logró una disminución significativa de 98% para ambos parámetros. La membrana demostró ser eficiente. El rango de cumplimiento de cloro residual en agua potable es de ≥ 0.20 mg/L- ≤ 4.0 mg/L. Luego de la filtración por membrana, los resultados obtenidos fueron menor a lo permitido en agua potable pero regularmente el agente desinfectante se aplica luego de la filtración por lo que este resultado en este estudio nos indica como referencia que la membrana fue selectiva y resistente en cuanto al cloro residual. El cloro total es requerido y regulado en los permisos de descarga (NPDES). La regulación de este puede variar, pero en la planta de estudio la regulación del cloro total en la descarga debe medir < 0.02 mg/L. En este estudio, la remoción de cloro total para agua potable fue de 98% con un valor promedio mínimo de 0.03 mg/L y para agua cruda de 0.02 mg/L. En ninguna de las dos el cloro total cumplió

con lo requerido en el permiso de descarga para esa instalación, no obstante, la membrana demostró eficiencia en remoción de cloro en agua potable y si se considera utilizarla para descargas de agua, se podría modificar la membrana para que sea aún más selectiva con cloro total, pero para esto es necesario realizar más estudios. También se podría utilizar un químico luego de la filtración por membrana, que ayude al cumplimiento del cloro total en el agua como por ejemplo el bisulfito. Por último, la turbidez de agua cruda fue removida a un 99% con un valor promedio mínimo de 0.17 NTU cumpliendo con el MCL (0.30 NTU) de turbidez en agua potable. La membrana cumplió en este estándar primario y puede utilizarse para el tratamiento de agua potable. Para agua potable el valor promedio mínimo obtenido luego de la filtración por membrana fue de 0.23 NTU y aunque aumento levemente, también cumplió con el MCL para turbidez en agua potable por lo que la membrana si cumplió en este estándar primario. El agua potable utilizada ya cumplía con el parámetro de turbidez desde su colecta por el tratamiento convencional por lo que este resultado se tomó como referencia.

Utilizar osmosis directa con la membrana TFC de poliamida removió el 99% de la turbidez del agua cruda, el 98% de cloro libre en agua potable, el 98% del cloro total en el agua potable, el 86% de la alcalinidad en el agua cruda y el 83% de la alcalinidad del agua potable, por lo que esta membrana podría ser considerada para el tratamiento de agua con problemas en estos parámetros. También podría utilizarse en el tratamiento de agua potable, pero se debe tomar en cuenta las limitaciones que pueda presentar y optimizar aún más el proceso (Ej. modificando membranas para brindar mayor selectividad, utilizar métodos alternos que regulen la alcalinidad, etc.). Sin embargo, su eficacia para remover más contaminantes del agua debe ser evaluada en proyectos o investigaciones futuras.

RECOMENDACIONES

Estudios futuros pueden incluir:

1. Medir la concentración de otros iones como hierro y manganeso, para conocer la efectividad de la membrana en la remoción de estos compuestos, ya que el agua cruda proviene de lago y estos parámetros regularmente son monitoreados en las plantas que tienen agua cruda proveniente de lago.
2. Determinar la efectividad de la membrana en otros parámetros de calidad del agua, como por ejemplo carbono orgánico total (TOC), pesticidas, etc.
3. Estudiar la membrana luego de cada corrida, para evaluar presencia de biopelículas, ensuciamiento u obstrucción de la membrana y/o deterioro de esta.
4. Utilizar agua directa del lago como otra muestra para evaluar y comparar los cambios en los parámetros.
5. Utilizar agua de una planta de tratamiento de membrana como muestra, para comparar la efectividad de la membrana de la planta vs la membrana fabricada del laboratorio, utilizando a los parámetros físico-químicos de calidad de agua como indicadores.
6. Utilizar una membrana comercial para comparar resultados y eficiencia de la membrana comercial con la membrana fabricada en el laboratorio mediante la medición de los parámetros físico-químicos.
7. Utilizar otras soluciones extractoras y/o concentraciones de soluto (NaCl) en la solución extractora, para evaluar su efecto en eficiencia de la purificación del agua.
8. Medir los parámetros físico-químicos a la solución extractora antes y después de la filtración por membrana para comparar resultados y evaluar cambios.

Bibliografía

- AAA. (Sin fecha). *Acueductospr: Agua Potable*. Recuperado el 28 de June de 2020, de Acueductospr: <https://acueductospr.com/agua-potable>
- AAA. (Sin fecha). *Acueductospr: Folletos educativos*. Recuperado el 12 de Julio de 2020, de Acueductospr: <https://acueductospr.com/web/guest/folletos-educativos>
- AAA. (Sin fecha). *Autoridad de Acueductos y Alcantarillados: Nuestra misión, visión y objetivos*. Recuperado el 14 de Junio de 2022, de acueductospr: <https://www.acueductospr.com/misi%C3%B3n-visi%C3%B3n-y-objetivos>
- AAA. (Sin fecha). *Orden Administrativa Num. OA-2020-02*. Recuperado el 8 de July de 2020, de Acueductospr: <https://acueductospr.com/orden-administrativa-n%C3%BAm.-oa-2020-02>
- AAA. (Sin fecha). *Visión, Misión y Objetivos*. Recuperado el 9 de July de 2020, de Acueductospr: <https://acueductospr.com/misi%C3%B3n-visi%C3%B3n-y-objetivos>
- Akbari, A., & Mojallali Rostami, S. M. (2014). Develoment of permeability properties of polyamide thin film composite nanofiltration membrane by using the dimethyl sulfoxide additive. *Water Reuse and Desalination*, 4(3), 174-181. Recuperado el 18 de October de 2023
- Al-Hobaib, A. S., Al-Sheetan, K. M., Shaik, M. R., & Al-Suhybani, M. S. (2017). Modification of thin-film polyamide membrane with multi-walled carbon nanotubes by interfacial polymerization. *Applied Water Science*, 7, 4341-4350. Recuperado el 11 de October de 2023
- Aliyu, U. M., Rathilal, S., & Isa, Y. M. (2018). Membrane desalination technologies in water treatment: A review. *Water Practice & Technology*, 13(4), 738-752. doi:10.2166/wpt.2018.084
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23 ed.). (L. L. Bridgewater, Ed.) Washington DC, United States of America: Rodger B.Baird (WEF), Andrew D. Eaton (AWWA), Eugene W. Rice (APHA).
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico. (2013). *Manual Sistema de Control de Proceso Planta Filtros Betances PWSID Num. PR003373*. ETAG Corporation.
- Badea, G., Farcas, A., Lacob, C., & Muresan, D. (2012). Water treatment by membrane technique, a solution for producing water. *Buletin Stinintific al Universitatii de Nord Baia Mare*, XXVI, 195-200. Recuperado el 5 de 10 de 2023

- Bruggen, B. V., Vandecasteele, C., Gestel, T. V., Doyen, W., & Leysen, R. (2003). A Review of Pressure-Driven Membrane Processes in Wastewater Treatment and Drinking Water Production. *Environmental Progress*, 22(1), 46-56.
- Chowdhury, M. R., Steffes, J., Huey, B. D., & McCutcheon, J. R. (2018). 3D printed polyamide membranes for desalination. *Science*, 361(6403), 682-686. doi:10.1126/science.aar2122
- Cruz Tato, P., Ortiz Quiles, E. O., Vega Figueroa, K., Santiago Martoral, L., Flynn, M., Diaz Vazquez, L. M., & Nicolau, E. (20 de Marzo de 2017). Metalized Nanocellulose Composites as a Feasible Material for Membrane Supports: Design and Applications for Water Treatment. *Environmental Science and Technology*, A-K.
- Cruz Tato, P., Rivera Fuentes, N., Flynn, M., & Nicolau, E. (16 de Abril de 2019). Anti-Fouling Electroconductive Forward Osmosis Membrane: Electrochemical and Chemical Properties. *ACS Applied Polymer Materials*, A-J.
- El-Zahhar, A. A., Alghamdi, M. M., Alshahrani, N. M., Awwad, N. S., & Idris, A. M. (2022). Development of Composite Thin-Film Nanofiltration Membranes Based on Polyethersulfone for Water Purification. *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 4350-4361. Recuperado el 2 de January de 2024
- EPA. (June de 2001). *Drinking Water Requirements for State and Public Water Systems Stage 1 and Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules*. Recuperado el 10 de January de 2023, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1009Q0H.txt>
- EPA. (2001). *Environmental Protection Agency*. Recuperado el 22 de February de 2020, de Environmental Protection Agency Publications: <http://www.epa.ie/pubs/advice/water/quality/parametersofwaterquality.html>
- EPA. (October de 2003). *El Agua del Grifo- lo que usted debe saber*. Recuperado el 10 de January de 2022, de EPA Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1008ZO0.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000%20Thru%202005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQField>
- EPA. (December de 2005). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems Stage 1 and Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules*. Recuperado el 11 de January de 2023, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=2000E99D.txt>
- EPA. (August de 2010). *Ground Water and Drinking Water National Primary Drinking Water Regulations*. Recuperado el 9 de January de 2023, de EPA United States Environmental

Protection Agency: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>

- EPA. (21 de August de 2017). *Ground Water and Drinking Water: National Primary Drinking Water Regulation Table*. Recuperado el 2 de August de 2020, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulation-table>
- EPA. (21 de March de 2017). *Water Infrastructure and Resiliency Finance Center*. Recuperado el 15 de July de 2020, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/waterfinancecenter/small-water-systems-puerto-rico>
- EPA. (18 de September de 2018). *Memorandum of Understanding: Community Drinking Water Systems in Puerto Rico*. Recuperado el 11 de July de 2020, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/pr/memorandum-understanding-community-drinking-water-systems-puerto-rico>
- EPA. (24 de September de 2021). *Compliance Safe Drinking Water Act (SDWA) Compliance Monitoring*. Recuperado el 16 de June de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/compliance/safe-drinking-water-act-sdwa-compliance-monitoring>
- EPA. (28 de September de 2021). *Laws & Regulations Summary of the Safe Drinking Water Act*. Recuperado el 15 de 06 de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-safe-drinking-water-act>
- EPA. (15 de November de 2022). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems Chemical Contaminant Rule*. Recuperado el 16 de January de 2023, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwreginfo/chemical-contaminant-rules>
- EPA. (30 de March de 2022). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems Revised Total Coliform Rule and Total Coliform Rule*. Recuperado el 7 de January de 2023, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwreginfo/revised-total-coliform-rule-and-total-coliform-rule>
- EPA. (27 de July de 2022). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems Stage 1 and Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rules*. Recuperado el 9 de January de 2023, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwreginfo/stage-1-and-stage-2-disinfectants-and-disinfection-byproducts-rules>
- EPA. (1 de July de 2022). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems: Ground Water Rule*. Recuperado el 3 de August de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwreginfo/ground-water-rule>

- EPA. (1 de July de 2022). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems: Surface Water Treatment Rules*. Recuperado el 2 de August de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/dwreginfo/surface-water-treatment-rules>
- EPA. (16 de November de 2022). *Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems Radionuclides Rule*. Recuperado el 22 de January de 2023, de EPA Environmental Protection Agency of United States: <https://www.epa.gov/dwreginfo/radionuclides-rule>
- EPA. (18 de April de 2022). *EPA en Español Agua*. Recuperado el 9 de July de 2022, de EPA Agencia de Proteccion Ambiental de Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/espanol/agua>
- EPA. (14 de June de 2022). *EPA en español El agua potable*. Recuperado el 10 de July de 2022, de EPA Agencia de Proteccion Ambiental de los Estados Unidos: <https://espanol.epa.gov/espanol/el-agua-potable>
- EPA. (26 de January de 2022). *Ground Water and Drinking Water, National Primary Drinking Water Regulations*. Recuperado el 18 de June de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
- EPA. (6 de July de 2022). *Laws & Regulations Summary of the Clean Water*. Recuperado de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>
- EPA. (15 de February de 2022). *Overview of the Safe Drinking Water Act*. Recuperado el 17 de June de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/sdwa/overview-safe-drinking-water-act>
- EPA. (13 de June de 2022). *Safe Drinking Water Act (SDWA)*. Recuperado el 17 de June de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/sdwa>
- EPA. (17 de February de 2022). *Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals*. Recuperado el 18 de June de 2022, de EPA United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals>
- EPA. (23 de June de 2022). *Title XIV of Public Health Service Act: Safety for Public Water Systems (Safe Drinking Water Act)*. Recuperado el 10 de July de 2022, de EPA United States Environmental Agency: <https://www.epa.gov/sdwa/title-xiv-public-health-service-act-safety-public-water-systems-safe-drinking-water-act-0>

EPA. (13 de January de 2022). *Water Sense en Español Nuestra agua*. Recuperado el 9 de July de 2022, de EPA Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos:
<https://espanol.epa.gov/watersense/nuestra-agua>

EPA. (22 de November de 2023). *Implementación de las leyes sobre el agua*. Obtenido de EPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos:
<https://espanol.epa.gov/espanol/implementacion-de-la-leyes-sobre-el-agua>

Hach Company. (December de 2015). *Hach*. Obtenido de <https://www.hach.com/nitrogen-ammonia-test-kit-model-ni-8/product-downloads?id=7640220993&callback=qs>

Hach Company. (21 de Julio de 2015). *Hach Be Right*. Recuperado el 23 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID=2635300&productID_option=d__value&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (Junio de 2017). *Hach*. Obtenido de <https://www.hach.com/pocket-colorimeter-ii-chlorine-free-and-total/product-downloads?id=7640442953&callback=qs>

Hach Company. (Abril de 2017). *Hach*. Recuperado el 27 de Abril de 2018, de HQ40D Portable Multi Meter pH, Conductivity, Salinity, TDS, Dissolved Oxygen(DO), ORP and ISE For Water Downloads: <https://www.hach.com/hq40d-portable-multi-meter-ph-conductivity-salinity-tds-dissolved-oxygen-do-orp-and-ise-for-water/product-downloads?id=7640501639>

Hach Company. (5 de Enero de 2018). *Hach Be Right*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID=2283449&productID_option=d__value&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (8 de Enero de 2018). *Hach Be Right*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheets (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID=2283549&productID_option=d__value&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (8 de Enero de 2018). *Hach Be Right*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID=2283549&productID_option=d__value&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

ge=d__EN&subformat=d__-
1&productID=2283649&productID_option=d__value&productName_option=d__~value
~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (2 de Febrero de 2018). *Hach Be Right*. Recuperado el 20 de mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID_option=d__value&productName=nessler%20reagent&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (12 de Febrero de 2018). *Hach Be Right*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID_option=d__value&productName=dpd%20free&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (12 de Febrero de 2018). *Hach Be Right*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:
http://sds.hach.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&language=d__EN&subformat=d__-1&productID_option=d__value&productName=dpd%20total&productName_option=d__~value~&reviseddate_condition=d__eq&publisheddate_condition=d__eq

Hach Company. (Marzo de 2018). Spec Color Standard. *DPD-Chlorine-LR Secondary Standards kit*. Loveland, CO, Estados Unidos.

Hidayati Othdman, N., Hashimah Alias, N., Syazana Fuzil, N., Marpani, F., Zaman Shahrudin, M., Ming Chew, C., . . . Fauzi Ismail, A. (2022). A Review on the Use of Membrane Technology Systems in Developing Countries. *Membranes*, 12(30), 1-37. Recuperado el 4 de January de 2024, de <https://doi.org/10.3390/>

Ibraheem, B. M., Aani, S. A., Alsarayreh, A. A., Alsalhy, Q. F., & Salih, I. K. (2023). Foward Osmosis Membrane: Review of Fabrication, Modification, Challenges and Potencial. *Membranes*, 13(379), 1-54. Recuperado el 7 de January de 2024, de <https://doi.org/10.3390/membranes13040379>

Kolangare, I. M., Isloor, A. M., Inamuddin, Asiri, A. M., & Ismail, A. F. (2019). Improved desalination by polyamid membranes containing hydrophilic glutamine and glycine. *Environmental Chemistry Letters*, 1053- 1059.

Korenak, J., Basu, S., Balakrishnan, M., Nielsen, C. H., & Petrinic, I. (2017). Forward Osmosis in Wastewater Treatment Process. *Acta Chim. Slov.*(64), 83-94.

La Motte. (19 de Junio de 2015). *La Motte*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:

https://lamotte.thewerco.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&plant=d__-1&language=d__EN&format=d__-1&subformat=d__-1&productName_option=d__~value~&CUSTOM1=3467-01&CUSTOM1_option=d__~value~

La Motte. (15 de Julio de 2015). *La Motte*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:

https://lamotte.thewerco.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&plant=d__-1&language=d__EN&format=d__-1&subformat=d__-1&productName_option=d__~value~&CUSTOM1=3467-01&CUSTOM1_option=d__~value~

La Motte. (28 de Abril de 2016). *La Motte*. Recuperado el 20 de Mayo de 2018, de Safety Data Sheet (SDS) Web Site:

https://lamotte.thewerco.com/private/results.aspx?__VIEWSTATEGENERATOR=D6323F43&plant=d__-1&language=d__EN&format=d__-1&subformat=d__-1&productName_option=d__~value~&CUSTOM1=3467-01&CUSTOM1_option=d__~value~

La Motte Company. (2015). *La Motte Alkalinity Kit Direct Reading Titrator, 0-200ppm Code 3467-01*. Chestertown.

La Motte Company. (2015). *La Motte Direct Reading Titrator General Instructions Code 1649*. Chestertown.

Laskawiec, E., Madej, M., Dudziak, M., & Wyczarska-Kokot, J. (2017). The use of membrane techniques in swimming pool water treatment. *Journal of Ecological Engineering*, 18(4), 130-136. Recuperado el 3 de December de 2023

Logsdon, G. S., Horsley, M. B., Freeman, S. D., Neemann, J. J., & Budd, G. C. (2006). Filtration processes-A distinguished history and a promising future. *American Water Works Association Journal*, 98(3), 150-154,157-162. Recuperado de <https://uprm.idm.oclc.org/login?url=https://www-proquest-com.uprm.idm.oclc.org/scholarly-journals/filtration-processes-distinguished-history/docview/221628585/se-2?accountid=28498>

Madhura, L., Kanchi, S., Sabela, M. I., Singh, S., Bisetty, K., & Inamuddin. (2017). Membrane technology for water purification. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 343-365. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0699-y>

- OMS. (21 de March de 2022). *Acceso/ Centro de Prensa/ Notas descriptivas/ Detail/ Agua para consumo humano*. Recuperado el 9 de July de 2022, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Rastgar, M., Shakeri, A., & Salehi, H. (2019). Study of polyamide thin film characteristics impact on permeability/ selectivity performance and fouling behavior of forward osmosis membrane. *Environ Sci Pollut Res*, 26, 1181-1191. Recuperado el 11 de October de 2023
- Rhodes Trussell, R. (2006). Water Treatment: The past 30 years. *American Water Works Association Journal*, 98(3), 100-108. Recuperado de <https://uprm.idm.oclc.org/login?url=https://www-proquest-com.uprm.idm.oclc.org/scholarly-journals/water-treatment-past-30-years/docview/221565520/se-2?accountid=28498>
- Rius, A. C., Garcia, M., & Sanchez, N. (Octubre de 2015). Manual for the Certification of Laboratories Analyzing Drinking Water. *Puerto Rico Drinking Water Laboratory Certification Program Manual for the Certification of Laboratories Analyzing Drinking Water*. San Juan, Puerto Rico.
- Sharma, S., & Bhattacharya, A. (2017). Drinking water contamination and treatment techniques. *App Water Sci*, 7, 1043-1067. doi:10.1007/s13201-016-0455-7
- Shen, L., Cheng, R., Yi, M., Hung, W. S., Japip, S., Tian, L., Wang, Y. (2022). Polyamide-based membrane with structural homogeneity for ultrafast molecular sieving. *Nature communications*, 13(500), 1-11. Recuperado el 31 de October de 2023
- SP Scienceware. (2020). *H-B Easy-Read General Purpose Liquid-In-Glass Thermometer; -20 to 110C, 76mm Immersion Environmentally Friendly*. Recuperado el 21 de February de 2020, de Bel-Art.H-B Instrument SP SCIENCEWARE Prepare to discover: <https://www.belart.com/h-br-easy-readr-general-purpose-liquid-in-glass-thermometer-20-to-110-c-partial-immersion-enviro-safer-non-toxic-liquid-fill.html>
- Thermo Fisher Scientific. (s.f.). *Thermo Scientific Nalgene TM Wide Mouth HDPE Economy Bottles with Closure*. Recuperado el 14 de September de 2019, de Thermo Fisher Scientific: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/2189-0032#/2189-0032>
- Tian, M., Ma, T., Goh, K., Pei, Z., Chong, J. Y., & Wang, Y. N. (2022). Foward osmosis membranes: The significat roles of selective layer. *Membranes*, 12(955), 1-22. Recuperado el 25 de October de 2023
- Yu, Y., Zhang, X., Lu, P., He, D., Shen, L., & Li, Y. (2022). Enhanced Separation Performance of Polyamide-Thin Film Nanocomposite Membranes with Interlayer by Constructed Two-Dimensional Nanomaterials: A Critical Review. *Membranes*, 12(1250), 1-16. Recuperado el 2 de January de 2023, de <https://doi.org/10.3390/>

APÉNDICES

Apéndice 1. Resultados de la eficiencia de la membrana.

Muestra	J_w Promedio LMH(L/m².h)	% reducción turbidez	% reducción alcalinidad	% reducción cloro libre	% reducción cloro total
Cruda	27	99	86	-	-
Potable	27	-	83	98	98

Para determinar los flujos de agua (J_w) de la membrana se utilizó la siguiente ecuación:

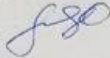
$$J_w = \frac{\Delta V}{A \cdot t}$$

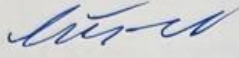
Donde ΔV es el volumen (en litros) de agua que permeo desde la solución alimentadora hasta la solución extractora, A es al área de la membrana (en m²) y t es el tiempo de duración del proceso de separación (en horas).

Apéndice 2. Documento de permiso firmado para realizar el estudio con el agua cruda, agua tratada de la planta de filtración PF Betances del municipio de Cabo Rojo, del Área de San German, Región Oeste de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico.

19 de marzo de 2018

A: Sr. Ebdiel Escobar Castro
Director de área/ Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico
Área de San German

A: Sr. Joaquín Báez 
Gerente Sistemas Ac/Al/ Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico
Área de San German

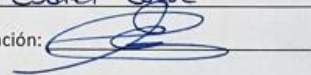
A: Sr. Santiago Irizarry 
Supervisor Operadores Ac/Al/ Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico
Área de San German

Reciban un cordial saludo,

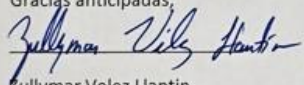
Como es de su conocimiento estoy realizando estudios graduados en la Universidad Interamericana de Puerto Rico. El programa graduado requiere una investigación por parte del estudiantado para presentarla y defenderla para la otorgación del grado (Tesis). Anteriormente les había comunicado sobre mi tema de investigación basado en el tema de purificación de agua mediante membrana. Como parte del procedimiento, se colectará agua cruda y agua tratada de PF Betances para propósitos investigativos como parte de mi investigación de tesis de maestría. Tengo conocimiento de que la colecta de estas muestras fue aprobada verbalmente. Aun así me gustaría este permiso fuera oficializado por escrito.

Mediante esta carta se expresa y hace oficialmente su consentimiento de aprobación para la toma de muestras de agua cruda y agua potable de PF Betances con propósitos investigativos académicos de parte de la Sra. Zulymar Vélez Llantín como parte de sus tesis de maestría del programa graduado de Ciencias Ambientales de la Universidad Interamericana de Puerto Rico, recinto de San German.

Personas que autorizan el uso de muestras para la investigación: Ebdiel Escobar

Firma de personas que autorizan el uso de muestras para investigación: 

Fecha: 03-19-18

Gracias anticipadas,

Zulymar Velez Llantín
Operadora de Planta Agua Potable IV
PF Betances, Cabo Rojo P.R. / Área de San German

Apéndice 3. Carta de solicitud de permiso firmada para utilizar equipos de medición disponibles en PF Betances para medir los parámetros físico-químicos posibles y realizados en este estudio.

13 de septiembre de 2018.

A quien pueda interesar:

Mi nombre es Zulymar Vélez Llantín. Actualmente, soy empleada de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) de Puerto Rico en el área de San German. Ocupo el puesto de operador de planta de agua potable en la Planta de filtros Monte del Estado, Maricao, P.R. También curso estudios graduados en Ciencias Ambientales en la Universidad Interamericana de Puerto Rico. El programa graduado requiere una investigación por parte del estudiantado para presentarla y defenderla para la otorgación del grado (Tesis). Mi tema de investigación se basa en purificación de agua mediante membrana. Como parte del procedimiento, se colectará agua cruda y agua tratada de PF Betances para propósitos investigativos. Anteriormente había comunicado sobre mi tema de investigación mediante la solicitud de permiso para coleccionar agua de PF Betances para la investigación. Como parte de la investigación se realizarán una serie de pruebas físico-químicas al agua antes y después de haberlas filtrado por membrana. La filtración por membrana se realizará en la Universidad de Puerto Rico recinto de Río Piedras. Por esto, deseo solicitar y pedirles ayuda para si es posible me presten algunos equipos portátiles con calibración vigente de la AAA para poder medir los parámetros en estudio lo más rápido posible luego de la colecta de muestra de agua y después de la filtración por membrana. Le agradeceré si pueden me presten los siguientes equipos y donen algunos reactivos para realizar las pruebas de los siguientes parámetros:

- 1- Alcalinidad= Kit de lectura directa (La motte)
- 2- Amonia= Kit de prueba "Ammonia Nitrogen" NI-8 (Hach)
- 3- Cloro libre y cloro total= Colorímetro portátil II (Hach)
- 4- Hierro y manganeso= Colorímetro 890DR (Hach)
- 5- Ph y temperatura= Metro HQ40d (Hach)
- 6- Turbidez= Turbidímetro portátil.

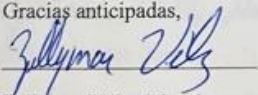
***De no tener alguno de estos instrumentos y/o equipos podrían sustituirse por uno equivalente.**

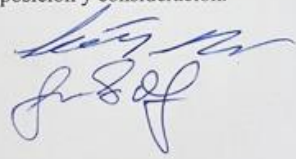
El préstamo de instrumentos y donación de reactivos seria para una totalidad de 4 días de estudio (Un día cada dos semanas durante dos meses consecutivos). Se notificará con anticipación el día que se necesiten los instrumentos y reactivos. Cada vez que finalice el día de estudio se devolverán los instrumentos hasta que nuevamente se necesite el equipo en el próximo día de estudio. La solicitud de ayuda la hago debido a que no cuento con beca, fondo o apoyo económico para realizar la investigación, pues sino tendría que costearlo yo misma y tengo conocimiento que estos instrumentos y/o equipos son costosos.

Mediante esta investigación, se medirá la efectividad de la membrana a utilizarse en la remoción de contaminantes y purificación de agua. Para esto, se medirán parámetros como los mencionados anteriormente, antes y después de la filtración por membrana para comparar los resultados. De obtener resultados positivos esperados, este proyecto piloto podría ser implementado a gran escala en un futuro.

Le agradeceré grandemente su ayuda, disposición y consideración.

Gracias anticipadas,


Zulymar Vélez Llantín



AAA SanGerman 13SEP18am9:09

Operadora de Planta Agua Potable IV

PF Monte del Estado, Maricao P.R. / Área de San German