



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN QUÍMICA

TESIS

**ECONOMÍA CIRCULAR DEL AGUA: CASO DE EMBOTELLADORA
DPURA.**

Para obtener el título de
Licenciada en Química

PRESENTA

Erika Haniel Oliva Bello

DIRECTORA

Dra. Gabriela A. Vázquez Rodríguez

Mineral de la Reforma, Hgo., México, 29 de enero del 2026



Mineral de la Reforma, Hgo., a 29 de enero de 2026

Número de control: ICBI-D/149/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Química **Érika Haniel Oliva Bello**, quien presenta el trabajo de titulación "**Economía circular del agua: caso de embotelladora DPura**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.


A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Claudia Coronel Olivares

Secretario: Dr. Marcelino Antonio Zúñiga Estrada

Vocal: Dra. Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez

Suplente: Dr. José Belisario Leyva Morales



JOSE B. LEYVA M.

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

Agradecimientos y dedicatorias

A mi asesora, la Dra. Gabriela A. Vázquez Rodríguez, por despertarme el interés por la química que sucede en nuestro planeta y la belleza de encontrar esperanza aún en la peor situación.

A mi pareja, Jared, por ser guía y compañía constante en este camino, por recordarme inclusive en los momentos más difíciles que rendirse nunca fue una opción, por sostenerme con paciencia, caminar a mi lado con amor y celebrar conmigo cada meta alcanzada. Gracias por ser un pilar fundamental en mi vida y en la culminación de este sueño.

A mis padres, Héctor y Erika y a mis hermanas Dara, Zabdi y Elda, por siempre creer en mí, por sembrarme una mentalidad de fortaleza y libertad, por motivarme a superarme cada día, por darme las herramientas para salir adelante y enseñarme a tener a Dios siempre presente.

A mis amigas, Casandra, Gleysi, Paulina, Vania y Ximena por su apoyo durante la carrera, por esas incontables risas que alimentaron mi alma y por su amistad honesta que perdura más allá de las clases.

A mis perritos Coco, Tacha, Botas y Togo por ser mi motor y mi compañía durante las noches de desvelo y mi consuelo durante los días malos.

A todos los profesores de la licenciatura en Química de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, a quienes admiro muchísimo por su notable intelecto e indudable vocación a la ciencia.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	8
1.1. Introducción.....	8
1.2. Economía circular.....	10
1.2.1. Economía circular del agua	10
1.3. Procesos de membrana para el tratamiento de agua	12
1.3.1. Membranas en el tratamiento de agua	13
1.3.2. Ósmosis inversa.....	15
1.3.2.1. Tratamiento de aguas por ósmosis inversa	16
1.3.2.2. Componentes de un sistema de ósmosis inversa	17
1.3.2.3. Ventajas y desventajas del tratamiento de aguas por ósmosis inversa	18
1.3.3. Electrodialisis	19
1.3.3.1. Ventajas y desventajas del tratamiento de aguas por electrodialisis.....	20
1.4. Humedales	21
1.4.1. Humedales artificiales	22
1.4.2. Clasificación de humedales.....	23
1.4.2.1. Según el tipo de vegetación utilizada para su operación.....	23
1.4.2.2. Según el régimen del flujo del agua	24
1.4.3. ¿Qué sucede en un humedal artificial?.....	26
1.4.4. Lecho filtrante	27
1.5. Planteamiento del problema	29
1.6. Justificación.....	29
1.7. Objetivos.....	31
1.7.1. General.....	31
1.7.2. Específicos	31
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	32
2.1. . Descripción de planta modelo	32
2.2. Análisis químicos del agua.....	33
2.2.1. Determinación de conductividad eléctrica y pH	33
2.2.2. Determinación de alcalinidad.....	33

2.2.3 Determinación de sulfatos.....	33
2.2.4 Determinación de sodio.....	34
2.2.5 Determinación de dureza.....	34
2.3. Construcción del humedal artificial.....	35
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.1. Análisis químico del agua.....	38
3.2. Propuestas de mejora del proceso.....	40
3.3. Pruebas preliminares de los materiales filtrantes	43
3.4. Montaje y operación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	45
3.5. Modelo de economía circular: planta embotelladora Dpura	48
CAPÍTULO IV. CONCLUSIÓN	50
CAPITULO V. PERSPECTIVAS	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de membrana según su estructura.	14
Tabla 2. Ventajas y desventajas del uso de un equipo de ósmosis inversa para el tratamiento de aguas.....	18
Tabla 3. Ventajas y desventajas del uso de un equipo de electrodiálisis para el tratamiento de aguas.....	21
Tabla 4. Clasificación de humedales según su operación.....	23
Tabla 5. Clasificación de humedales según su tipo de flujo.....	24
Tabla 6. Pruebas de flujo de riego.....	36
Tabla 7. Montaje del humedal artificial.....	37
Tabla 8. Composición química de las muestras de agua producto y alcalina.....	38
Tabla 9. Composición química de la muestra de agua salitrosa.....	38
Tabla 10. Análisis financiero sobre la propuesta de adquirir un equipo de electrodiálisis.....	41
Tabla 11. Análisis financiero sobre la propuesta de adquirir una tercera membrana de ósmosis inversa.....	42
Tabla 12. Pruebas de medios filtrantes.....	43
Tabla 13. Resultados de las pruebas experimentales a humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.....	46
Tabla 14. Lecturas de turbidez en unidades de absorbancia.....	46
Tabla 15. Ganancias con modelo lineal vs ganancias con modelo circular.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrategias de la economía circular del agua.	11
Figura 2. Proceso espontáneo de ósmosis.	15
Figura 3. Proceso no espontáneo de ósmosis inversa.....	16
Figura 4. Proceso tecnológico de producción de agua.....	17
Figura 5. Componentes de un equipo de sistema de ósmosis inversa.....	18
Figura 6. Esquema de módulo de electrodiálisis.....	19
Figura 7. Polarización por concentración.....	20
Figura 8. Mecanismos de remoción de contaminantes.....	27
Figura 9. Distribución de sistema de purificación en planta embotelladora DPura.	32
Figura 10. A) Prueba a columna 1 y B) Prueba a columna 4.....	35
Figura 11. Diagrama de proceso con equipo de electrodiálisis	41
Figura 12. Diagrama de proceso con triple membrana	42
Figura 13. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	45
Figura 14. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical.....	45
Figura 15. Coloración del efluente en la prueba 5 después de 24 horas.....	47
Figura 16. Modelo de economía circular: planta embotelladora Dpura.....	49

RESUMEN

Ante el impacto hídrico que enfrenta nuestro país y el mundo entero desde hace ya varias décadas, existe un constante interés en nuevas formas de impedir el desperdicio de agua, y de aprovecharla en todo tipo de actividades y de sectores en la industria. Una excelente opción para el tratamiento de aguas es el uso de un sistema de ósmosis inversa (OI), pues gracias a su membrana semipermeable es posible eliminar una gran variedad de contaminantes con una alta eficacia. Por ello, este tipo de tecnología es ampliamente utilizado en el tratamiento de agua de mar y en la potabilización de agua en plantas embotelladoras, tanto a gran escala como a nivel local. No obstante, al generar agua potable también se produce una corriente del doble de volumen de agua de rechazo, agua de descarte o también denominada agua salitrosa, cuyo caudal es rico en sales y otros contaminantes que fueron retenidos por la membrana.

La presente investigación se centra en la búsqueda de alternativas para la disminución del caudal de agua de rechazo y su tratamiento en la planta embotelladora de estudio: DPura, localizada en la colonia Bosques del Peñar, en Pachuca de Soto, Hidalgo. Para conseguir lo planteado, se midió la calidad del agua producto y del agua salitrosa, y se sugirieron propuestas para el tratamiento de esta última. Tras analizar las alternativas junto a sus respectivos presupuestos financieros, se decidió añadir una tercera membrana al equipo de ósmosis inversa ya instalado en la planta embotelladora, con el fin de recircular el agua de descarte por dicho sistema, además de modificar la distribución de las tuberías de la planta. Igualmente, se evaluó un sistema de humedales artificiales o construidos con la intención de remover la salinidad del agua de rechazo. Aunado a lo anterior, se formularon alternativas para un reúso con valor agregado para el agua salitrosa tratada; así mismo, se buscó ampliar y optimizar el uso de los recursos disponibles dentro de la planta embotelladora para la producción y venta de más productos que incrementen las ganancias económicas de la planta embotelladora y minimicen las pérdidas de producto, así como la disminución de residuos contaminantes que se disponen finalmente al medio ambiente.

Palabras clave: Tratamiento de agua, plantas embotelladoras, ósmosis inversa, agua de rechazo, salinidad, economía circular, humedales artificiales.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. Introducción

La situación en México respecto al agua, uno de nuestros recursos más valiosos, no luce prometedora en el presente o en un futuro cercano. Tan solo la disponibilidad promedio en el Valle de México pasó de 191 m³/hab en 2005 a 139 m³/hab en el año 2025 y, según las estadísticas, se estima que este valor disminuya por debajo de los 136 m³/hab al año en 2030 (Vega, 2025). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), alrededor de la mitad de la población mundial, 4 mil millones de personas, sufre de escasez de agua por lo menos durante una parte del año; esta situación, aunada al cambio climático, incrementa la incertidumbre acerca de la disponibilidad futura del agua (Chorong & Richard, 2025).

Diversos factores son los que han provocado la carestía de agua limpia que enfrenta en la actualidad no solo el país sino el mundo, tales como: el aumento en la densidad poblacional, que conlleva una sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento; el cambio climático, ya que afecta directamente al ciclo del agua al aumentar el contraste entre las precipitaciones que ocurren en temporada de lluvias y las de estiaje en diversas regiones del país (CONAGUA, 2019); y la deforestación, puesto que elimina la posibilidad de captación de lluvia y de regular el ciclo hidrológico, entre otros (COPARMEX, 2024). Una consecuencia de lo anterior se refleja en el porcentaje de áreas de sequía moderada a excepcional (D1 a D4) en el país, que fue de 13.7% al 31 de agosto de 2025, de acuerdo con el reporte del Monitor de Sequía de México (CONAGUA, 2025b). Durante la temporada de lluvias, se registró un 73.44% de almacenamiento durante el mes de agosto del presente año en el sistema Cutzamala (CONAGUA, 2025a), principal fuente de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México (CDMX); pese a ello, se estima que llegará el Día Cero en la ciudad en el año 2028, definido como el momento en que una región se torna incapaz de abastecer agua potable a su población. El desabasto que se vive en el presente es, consecuencia de la sobreexplotación de acuíferos, contaminación y pérdidas por fugas en la red de distribución de agua, debido a lo cual la ciudad se considera bajo estrés hídrico con tendencia a intensificarse en el futuro cercano (IDC, 2025). Ante la alarmante crisis hídrica que se vive en el país y el panorama desalentador que se prevé para el año 2050, es que se busca aprovechar el agua de manera eficiente para contribuir al desarrollo sostenible de los sectores productivos (CONAGUA, 2020).

Una propuesta para contribuir a ese objetivo es reusar el agua de rechazo proveniente de los procesos de ósmosis inversa (OI) que se implementan en plantas embotelladoras. La

ósmosis inversa es un proceso de separación por membrana que consiste en aplicar una presión superior a la denominada osmótica para que el efluente pueda fluir por una membrana semipermeable desde la disolución más concentrada hacia la más diluida, hasta alcanzar un nuevo equilibrio (Herrera, 2007). Este mecanismo de disolución-difusión permite remover sales disueltas, moléculas inorgánicas y moléculas orgánicas solubles con una eficacia mayor al 95% (Espwater, s.f.). Complementa los tratamientos terciarios en una planta de tratamiento de aguas y es muy empleado en plantas embotelladoras para la desalinización de agua. No obstante, su operación genera un gran volumen de agua de rechazo o salitrosa, pues de un litro de agua purificada se producen dos litros de aguas de rechazo (Bbagua, 2020). Debido a estas grandes pérdidas es que se proponen alternativas novedosas de reúso para las aguas salitrosas; tal como sucede en la Universidad Nacional Cheng Kung en China, la cual investiga su reutilización en la captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS por sus siglas en inglés) proveniente de procesos industriales y plantas de energía, con el objetivo de mitigar el cambio climático (Lee et al., 2024). Para la captura de carbono, el agua salitrosa proporciona los cationes metálicos necesarios (Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+}) que reaccionan con el dióxido de carbono (CO_2) generando bicarbonato y otros carbonatos; ya sea por medio del método Solvay que requiere de NaCl (abundante en el agua de rechazo) y de la adición de NH_3 para reaccionar con el CO_2 y finalmente formar NaHCO_3 , o por el método de la amina portadora cuya principal diferencia es que no requiere de NaCl y en su lugar, el CO_2 es absorbido por aminas para posteriormente reaccionar con $\text{Mg}(\text{OH})_2$ o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provenientes del agua salitrosa y producir $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ o $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, logrando esto al someter las aminas a calentamiento y a la previa precipitación de MgCO_3 y CaCO_3 contenidos en el caudal de descarte de OI (Bang et al., 2017). Las sales metálicas producidas pueden emplearse en la fabricación de cemento, de materiales de revestimiento y en otras aplicaciones industriales como un producto inorgánico CCU (Dickinson et al., 2024). Tras los estudios y pruebas realizadas, se alcanzó una reducción en la concentración de CO_2 mayor al 90%, por ende, se determinó que la aplicación de agua de descarte en el proceso de captura de carbono y remoción de sodio resulta ser bastante favorable (Lee et al., 2024).

En nuestro caso, se plantea hacer pasar el caudal rico en sales por un humedal artificial horizontal que permita obtener un efluente de mayor calidad que se pueda emplear como agua de riego siguiendo los parámetros establecidos en la normatividad, o inclusive, comercializar dicha agua tratada en el sector de la construcción. Un humedal artificial es una alternativa ecológica, cuyo objetivo es eliminar o reducir los contaminantes que contiene el agua a tratar y consiste en un estanque poco profundo e impermeabilizado con una geomembrana para evitar escorrentía; se rellena con una serie de medios filtrantes y sustrato sobre el cual se siembran especies vegetales, y se instalan tuberías para distribuir el afluente y recolectar el efluente para su disposición final (Rivas, 2022).

1.2. Economía circular

El modelo de economía circular fue impulsado en 2010 por la fundación Ellen MacArthur cuyo principio es preservar el valor de los materiales y productos durante el mayor tiempo posible. Este esquema de producción y consumo contradice al modelo de economía lineal cuyo procesamiento de los materiales implica grandes pérdidas y el final de los productos concluye en su disposición en vertederos o de manera indiscriminada en el ecosistema. El modelo tiene como objetivo que los residuos sean vistos como recursos en lugar de desechos, lo cual es posible conseguir al disminuir la generación de residuos al mínimo, evitar el ingreso de la mayor cantidad posible de residuos al medio ambiente y lograr que estos se reintegren al sistema productivo para su reciclado (Geissdoerfer et al., 2017).

La economía circular tiene como ideal maximizar el número de veces que se pueden usar los materiales, pues al prolongar el ciclo de vida se ahorra no solo el mismo material, sino también energía y mano de obra que se emplearía para la creación de un producto nuevo. Para reducir la presión ambiental en el ciclo de vida de los productos, evitando el ingreso de nuevo material y energía en los procesos, se requiere de una adecuada gestión de residuos que incluya jerarquización en la totalidad del ciclo, desde la prevención hasta la reutilización, la recuperación de energía, el reciclado, y la correcta gestión final de aquellos materiales que no sean posibles de reusar. Los beneficios del modelo radican en el sector económico y en el ambiental; además, la economía circular fomenta el rediseño de los productos para prolongar su tiempo de vida y la reducción de contaminantes y pérdidas durante su fabricación, encima de la recuperación de materiales que puedan tener nuevos usos (De Miguel et al., 2021).

1.2.1. Economía circular del agua

El agua se vende como un producto, pero también funge como recurso esencial para la economía mundial. Además, participa como servicio al ser utilizado para el almacenamiento o producción de energía ya sea cinética, térmica o biotérmica, así como transporte de materias primas biogénicas que proveen de servicios básicos tanto a ecosistemas como a las actividades humanas. Debido a este carácter multifacético del agua, surge el concepto de economía circular del agua (ECA o CEW por sus siglas en inglés), que hace referencia a un modelo económico que busca reducir, preservar y optimizar el uso del agua por medio de la prevención de residuos, el uso eficiente del agua y la conservación de su calidad, de esta manera garantiza la protección y conservación del medio ambiente. En dicho modelo, los principios establecidos deben cumplirse en todos los procesos en los que se utiliza, consume o trata el agua (Morseletto et al., 2022; OECD, 2025).

La ECA no descarta soluciones tradicionales, socialmente innovadoras y basadas en la naturaleza, mientras que estas iniciativas aprovechen el agua de manera eficiente, eviten el

desperdicio y conserven la calidad del agua por largos periodos de tiempo. Este sistema económico desempeña un papel importante en la gestión sostenible del agua, ya que busca la reestructuración del uso de este recurso vital y de su correcta valorización. De igual forma, plantea reestablecer los roles de las autoridades para lograr resultados verdaderamente benéficos hacia la sociedad y el planeta (Koseoglu et al., 2023).

Por ello, se establecieron estrategias que permiten replantear (*rethink* en inglés) la estructura y el concepto del uso del agua para facilitar la implementación de una aplicación circular a nivel doméstico, comercio local e inclusive a nivel industrial. Se clasifican en tres categorías: disminuir (*decreasing*), optimizar (*optimising*) y retener (*retaining*) (**Figura 1**) (Morsetto et al., 2022).

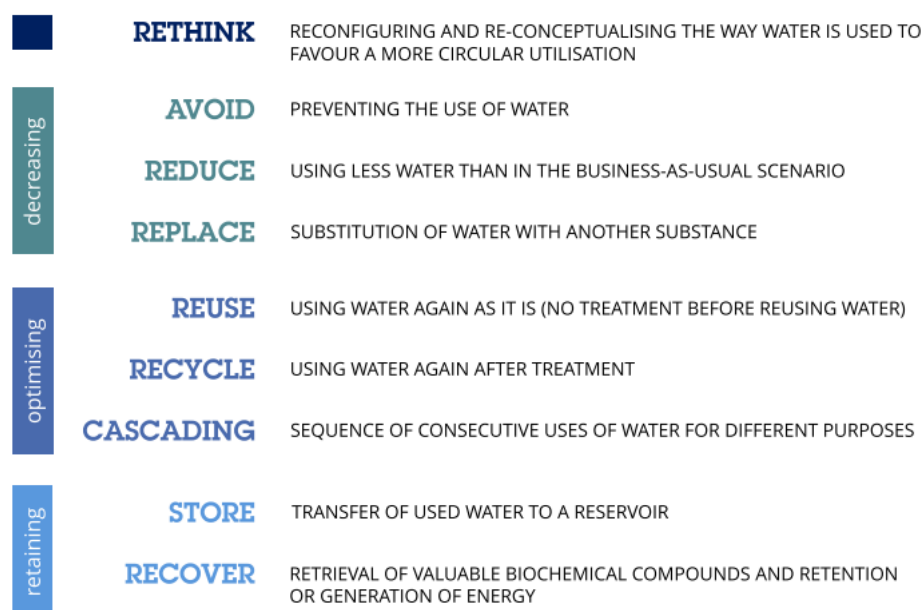


Figura 1. Estrategias de la economía circular del agua. Fuente: Morsetto et. al. (2022).

La primera categoría incluye, a su vez, tres estrategias para utilizar menos agua o no utilizarla para nada: evitar (*avoid*) hace referencia a esto último, es decir, a la disminución del uso de agua en un 100%, lo que implica la práctica de buscar alternativas que eviten en su totalidad la utilización de este recurso hídrico como sucede en los inodoros que realizan la descarga al vacío en lugar de los convencionales; otro ejemplo son las bombas al vacío empleadas en todo tipo de industrias. La segunda estrategia es reducir (*reduce*), la cual implica usar menos cantidad de agua, extraer menos agua de la fuente de origen y aprovecharla de manera eficiente; algunos ejemplos de aplicación ocurren en el uso doméstico como en las regaderas que utilizan mayor presión para ahorrar agua o en el sector de agricultura con la irrigación focalizada, así como optar por cultivos que requieran de menor cantidad de riego, e inclusive en el sector industrial al utilizar procesos que demanden menos agua (como los procesos de calentamiento solar, que no necesitan de vapor). Por último, la estrategia de reemplazar (*replace*) resulta similar a la de evitar (*avoid*) ya que ambas reniegan la utilización de agua, pero la diferencia radica en la sustitución de agua por

otra sustancia o material que no dañe al medio ambiente, un claro ejemplo de ello son los inodoros de composta que prefieren usar desecho de materia orgánica como hojas secas en vez de agua (Smol et al., 2020).

La categoría de optimizar prioriza la eficiencia y el ahorro es consecuencia del uso en múltiples ocasiones del mismo volumen de agua. Engloba la estrategia de reusar (*reuse*) que significa utilizar de nuevo un caudal de agua para el mismo u otro propósito sin ningún tipo de tratamiento, mientras que reciclar (*recycle*) requiere de la remoción de contaminantes para su reimplementación con la misma o distinta finalidad. Por último, la tercera estrategia, denominada cascada (*cascading*), es la utilización tanto de agua sin tratar como de agua tratada en una serie consecutiva de fases en procesos domésticos e industriales: por ejemplo, el vapor empleado para la producción de energía, al ser condensado puede emplearse para enfriamiento, después para limpieza del equipo y luego para descarga de inodoros; una vez tratada el agua de descarga, ésta puede aprovecharse en el riego de áreas verdes. Finalmente, la categoría de retener (*retaining*) agua puede alcanzarse de manera cuantitativa y cualitativa mediante los conceptos de almacenar (*store*) y recuperar (*recover*). Almacenar involucra la retención deliberada de agua tras un primer uso y transferir dicho volumen a depósitos tales como presas, cisternas o cuencas artificiales para una nueva finalidad tiempo después, mientras que la estrategia de recuperar se enfoca no solo en la conservación de una alta calidad del agua, sino en la extracción de materiales de gran valor e interés (nutrientes, metales preciosos, gas y materia orgánica), además de la generación de energía hídrica (Peydayesh & Mezzenga, 2024).

1.3. Procesos de membrana para el tratamiento de agua

La implementación de membranas en la tecnología de separación de contaminantes para el tratamiento de agua se ha ido incrementando en las últimas décadas, puesto que trabaja sin la adición de productos químicos, bajo un uso relativamente bajo de energía, en condiciones sencillas de operación, requiere de poco mantenimiento, genera un alto porcentaje de remoción y su principio es simple, pues la membrana actúa como un filtro con poros de tamaño específico que deja pasar el agua mientras retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias de manera selectiva al aplicar un potencial eléctrico o bien, bajo cierto gradiente de concentración en ambos lados de la membrana (Hernández, 2018).

En el tratamiento de aguas, las membranas pueden aplicarse para la recuperación de agua y para la extracción de materiales contenidos en los efluentes, ya sea en procesos de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, electrodiálisis y ósmosis inversa (Palacios et al., 2017). Dicha tecnología se aplica comúnmente en la industria de alimentos, del papel, biomedicina, petroquímica, nuclear, en la purificación de gases, así como en la recuperación de productos químicos de aguas residuales. Las membranas también sirven, mediante los procesos ya mencionados, para la producción de agua ultra pura que a su vez se emplea en la fabricación de productos farmacéuticos, cosméticos, pintura, entre otros. La ósmosis inversa es la técnica más estudiada y aplicada para la purificación de agua para consumo humano (Ayala et al., 2006).

1.3.1. Membranas en el tratamiento de agua

Las membranas son aquellas superficies que actúan como barreras físicas semipermeables cuya función es la separación de dos medios con distinto potencial químico, impidiendo el contacto entre ellos y restringiendo de manera selectiva el movimiento o flujo de las moléculas a través de ella como consecuencia del gradiente de potencial químico. Dicha filtración, permite la separación de especies químicas o biológicas nocivas para la salud humana del agua, lo que genera un efluente purificado y otro caudal conformado por un alto contenido de agentes contaminantes (Montaño, 2021).

Se emplean mayormente en el tratamiento de aguas y en la industria alimentaria debido a su elevada eficiencia en la remoción de contaminantes disueltos o dispersos en forma coloidal, inclusive si se encuentran en bajas concentraciones. Además, son procesos que pueden efectuarse en un amplio rango de temperatura y pH, son capaces de soportar altas presiones y trabajar de forma continua, conllevan un bajo consumo energético, no requieren el uso de reactivos para su funcionamiento, necesitan poco espacio físico y no demandan mantenimiento excesivo para su operación (Shannon et al., 2008; Montaño, 2021).

No obstante, aunque el uso de membranas mitiga el desperdicio de agua al tratar diversos tipos de caudales contaminados, también genera un caudal de rechazo o descarte concentrado en agentes contaminantes que, a su vez, requiere de un tratamiento secundario o terciario. Asimismo, para extender la vida útil de la membrana y preservar sus características, deben realizarse lavados periódicos que emplean sustancias químicas, las cuales finalmente se desechan al drenaje, lo que produce residuos nocivos al medio ambiente (Guizard, 2011).

Las membranas se constituyen por diversos materiales, entre ellos: polímeros orgánicos como poliamidas, polisulfonas o acetato de celulosa; así mismo, materiales inorgánicos como cerámica, vidrio o metales. El material del que están constituidas se determina por el tipo de filtración que se desea llevar a cabo e influye directamente en la eficiencia de separación debido a sus características y composición química, es decir, únicamente las sustancias solubles en ella pueden atravesarla (Lee et al., 2015).

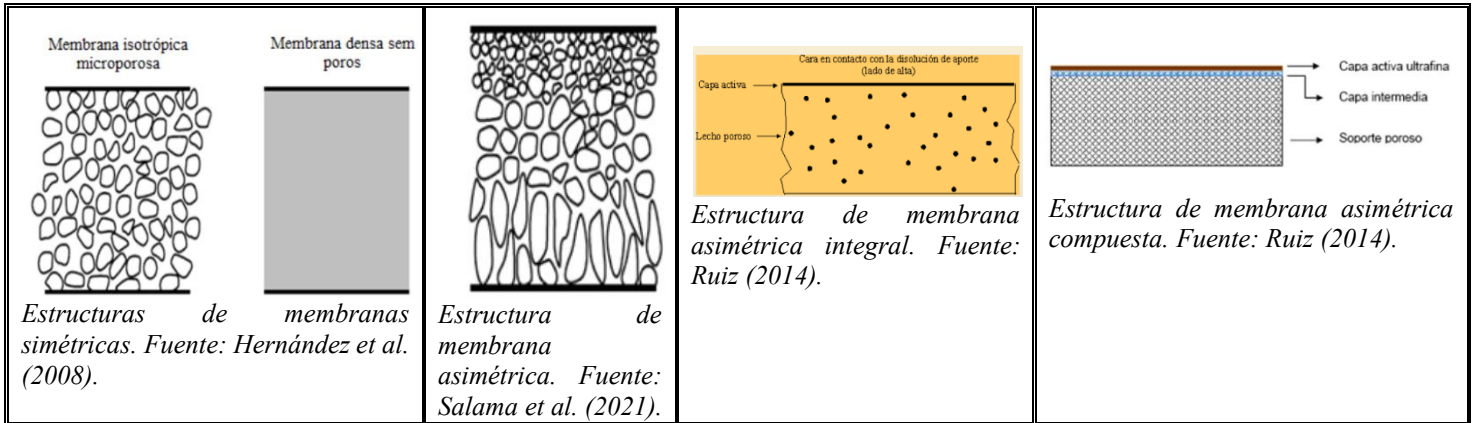
La propiedad fundamental que debe cumplir una membrana de ósmosis inversa es el carácter hidrofílico; bajo estas condiciones, la selectividad dependerá principalmente del coeficiente de reparto (coeficiente de distribución H) de soluto entre la membrana y el disolvente, y en menor medida, del coeficiente de difusión D_2 del soluto en la membrana. El coeficiente de reparto depende de la solvatación del soluto en la solución, pues a mayor solvatación incrementa la selectividad de la membrana hidrófila con respecto al soluto. El coeficiente de distribución H es mayor para las moléculas que para los iones, y en el caso de éstos últimos, los iones multivalentes son más solvatados que los iones pequeños, por tanto, son más retenidos por las membranas. En lo que respecta a los iones de una misma valencia, disminuye la tasa de retención si el peso molecular incrementa. Para iones de valencia distinta, la tasa de retención crece según su valencia (Ranjan et al., 2024).

Principalmente se utilizan las membranas fabricadas de acetato de celulosa, las cuales se componen por una capa activa (acetato de celulosa) unida a una base porosa con alta permeabilidad (base de poliéster no entretejido) en una disolución de acetona; además, en la última etapa de su elaboración se someten a un baño maría cuyo propósito es mejorar la permeabilidad y selectividad. Las poliamidas aromáticas también son consideradas una opción preferente para la composición de una membrana filtrante, ya que se constituyen por una base de polisulfona de carácter no selectivo, pero con alta porosidad, unida a una base de poliéster no entretejido, poroso y permeable; en una segunda etapa, se coloca una fina película selectiva y permeable sobre la base de polisulfona para formar la capa activa de dicha membrana. Esta conformación brinda una mejor combinación de paso de solvente y rechazo de sales en contraste con las membranas de acetato de celulosa; por otra parte, éstas últimas resultan ser más tolerantes a la degradación por cloro libre que las de poliamidas aromáticas, y por ende, son más estables en aguas residuales o industriales (Ruiz, 2014).

A continuación, la **Tabla 1** resume la clasificación de las membranas por su estructura.

Tabla 1. Tipos de membrana según su estructura. Fuente: Ruiz (2014).

Simétricas	Asimétricas		
	Asimétricas	Asimétricas integrales	Asimétricas compuestas
Aquella que posee una estructura porosa homogénea con las mismas propiedades fisicoquímicas en toda su estructura.	Estructura heterogénea, constituida por: una capa activa (fina capa polimérica), la cual presenta el carácter selectivo y en donde sucede el proceso de ósmosis; además de una capa subyacente porosa que actúa como soporte de la capa activa y es de mayor espesor.	La capa activa y la capa subyacente se encuentran fabricadas por el mismo material polimérico, derivando en un espesor comprendido entre 0.1-1.0 μm .	Se componen por: la capa superior activa que permite el paso del disolvente y restringe el de las sales (espesor aprox. De 2000 Å); la capa intermedia, que actúa como soporte de la capa activa y está formada por un material poroso diferente al de la capa activa; por último, la capa inferior es porosa y de mayor espesor, y aporta resistencia mecánica.



Para el tratamiento de agua por ósmosis inversa se utilizan mayormente las membranas asimétricas gracias a su elevada selectividad y permeabilidad en comparación con las otras (Ruiz, 2014).

1.3.2. Ósmosis inversa

Para entender el principio de ósmosis podemos visualizar un recipiente dividido a la mitad por una membrana semipermeable, el cual contiene disolvente en ambos lados (**Figura 2**). Al añadir una mayor cantidad de soluto en un lado del recipiente, el proceso espontáneo de ósmosis consiste en el movimiento de las moléculas de disolvente por la membrana en los dos sentidos, pero con una mayor velocidad en dirección de la solución de menor concentración de soluto hacia la solución más concentrada y el proceso finaliza cuando se igualan las velocidades. Al cesar el flujo, la presión ejercida por el disolvente es igual en ambos lados de la membrana y se denomina presión osmótica.

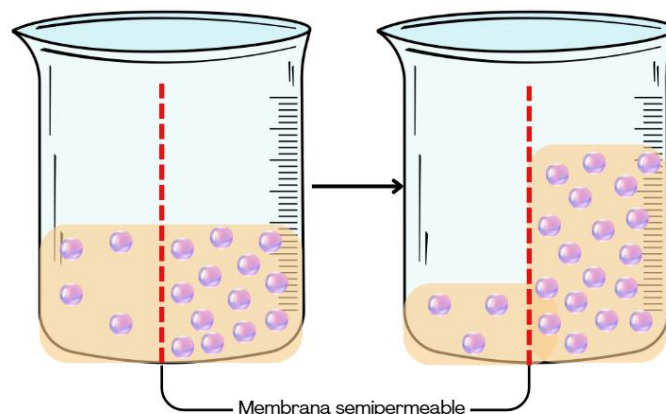


Figura 2. Proceso espontáneo de ósmosis. Fuente: Elaboración propia (2026).

Por tanto, para que ocurra la ósmosis inversa se necesita aplicar una fuerza que supere la presión osmótica, con ayuda de una bomba, sobre el lado del recipiente que contiene la solución más concentrada para generar un flujo hacia la solución diluida (**Figura 3**). Cabe

mencionar que la altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio depende de la presión que se aplica, la naturaleza de la membrana y las concentraciones de ambas soluciones (Ruiz, 2014).

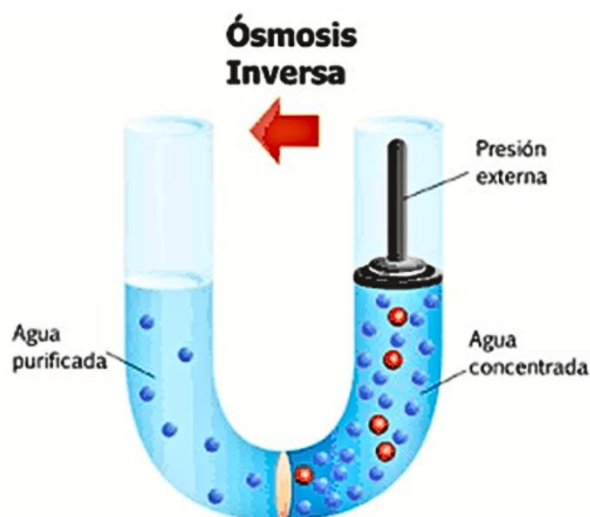


Figura 3. Proceso no espontáneo de ósmosis inversa. Fuente: CBR Ingeniería (2021).

El mecanismo de transferencia de la ósmosis inversa sucede por medio de la solubilización/difusión de las especies químicas o soluto a través de la membrana semipermeable por efecto de un gradiente de concentración y presión. Las moléculas de solvente se transfieren acompañadas por algunas moléculas de soluto según la selectividad de la membrana (Guizard, 2011).

1.3.2.1. Tratamiento de aguas por ósmosis inversa

En la década de los 60, se comenzaron a emplear membranas para desalinizar el agua como solución a la necesidad que presentaban muchos países de importación de agua, ya que no contaban con suficiente agua dulce para consumo humano, y esta acción, ayudó a mitigar el gasto económico, así como la demanda en su población. El proceso de desalinización de agua consiste en la separación de sales de una disolución acuosa y también, la separación entre las sales y el agua, lo que es posible lograr gracias a las nuevas tecnologías (Ruiz, 2014).

El tratamiento de agua por medio de un sistema de ósmosis inversa se basa en la naturaleza y características de las membranas semipermeables, que permiten el paso con mayor facilidad al agua dulce en contraste con el agua salada (Guizard, 2011). Lo anterior, produce una diferencia de potencial hidráulico entre esos dos líquidos cuando cada uno se sitúa a un lado de la membrana. Al incrementar de manera adecuada la presión en el lado del agua rica en sales, es posible forzar su flujo y retener sales, así como otros contaminantes en la membrana (Herrera, 2007). En la actualidad, se considera a la ósmosis inversa como una opción idónea para la desalinización de agua de mar, pero también es ampliamente utilizada en empresas tanto grandes como locales para tratar agua potable con el objetivo de reducir prácticamente en su totalidad el contenido de sólidos disueltos totales y obtener agua purificada para su uso y comercialización (Ruiz, 2014).

1.3.2.2. Componentes de un sistema de ósmosis inversa

El proceso tecnológico de purificación de agua (**Figura 4**) comienza con un prefiltro de sedimentos hilado de polipropileno, el cual se encarga de retener tierra, arena, lodo, sedimentos y partículas de oxidación para obtener agua con mejores propiedades organolépticas. Posteriormente, el afluente pasa a través del filtro de carbón activado granular, que remueve las bacterias o microorganismos, el cloro, olores e inclusive algunos químicos orgánicos. De igual manera, el filtro de carbón activado en bloque tiene como meta disminuir la turbidez y partículas suspendidas. Una vez que hubo un pretratamiento, el afluente fluye a través de la membrana de ósmosis inversa, la cual elimina microorganismos (virus, bacterias, hongos, entre otros), sales, minerales y otras partículas disueltas. El caudal de agua purificada atraviesa un postfiltro de carbón activado en línea, cuya etapa es la última para retener los olores y ajustar el sabor. Por último, de manera opcional se puede adicionar un esterilizador ultravioleta para la eliminación de cualquier bacteria, virus o microorganismo presente en el efluente (Aguapura 2015).

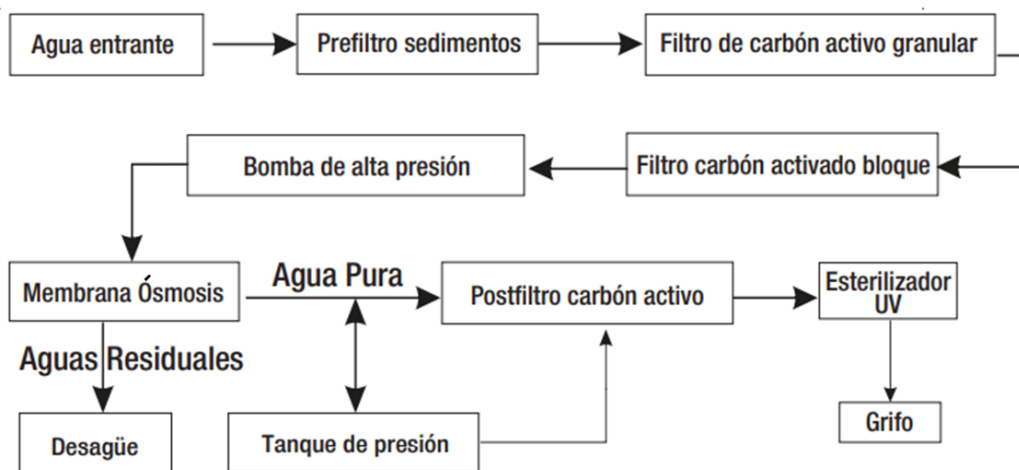


Figura 4. Proceso tecnológico de producción de agua. Fuente: Aguapura (2015).

Por otra parte, los componentes de un sistema de ósmosis inversa se muestran en la **Figura 5**.

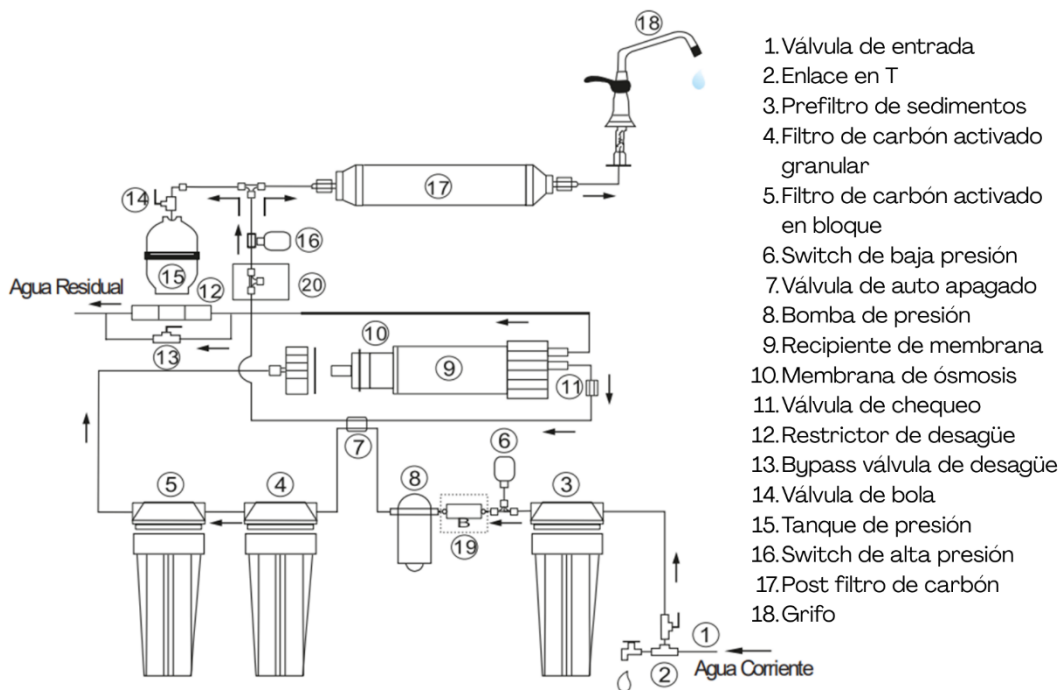


Figura 5. Componentes de un equipo de sistema de ósmosis inversa. Fuente: Aguapura (2015).

1.3.2.3. Ventajas y desventajas del tratamiento de aguas por ósmosis inversa

En la **Tabla 2** se sintetizan las ventajas y desventajas de la tecnología de ósmosis inversa para el tratamiento de aguas.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del uso de un equipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas. Fuente: Jarabo (2022).

<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Consigue remociones de sales, materia orgánica, iones y microorganismos con eficiencia mayor al 90%. ○ Genera efluentes de agua de alta calidad, incluso agua destilada. ○ Tiene la capacidad de tratar grandes volúmenes de agua. ○ Bajos costos de operación y poco mantenimiento. ○ Elimina el olor y el sabor del agua. ○ Ocupa poco espacio físico.
<p>Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Requiere de pretratamiento. ○ Produce un gran caudal de agua de rechazo, además, se desperdicia un gran volumen de agua para el lavado de membranas. ○ La eficiencia disminuye con el aumento de contenido de agentes contaminantes.

- A pequeñas escalas no resulta un negocio rentable.

1.3.3. Electrodialisis

Se trata de una tecnología de membrana que permite la separación o extracción de sustancias ionizadas disueltas de una disolución acuosa al suministrar energía eléctrica que actúa como fuerza directora para la migración iónica a través de las membranas de intercambio iónico. Normalmente, los iones se transfieren desde una solución menos concentrada hacia una solución con mayor concentración debido al intercambio iónico de la membrana y bajo la influencia del campo eléctrico (López, 2005).

En otras palabras, la electrodialisis es un proceso de separación electroquímica, en el que se emplean membranas cargadas junto con una diferencia de potencial eléctrico para aislar especies iónicas y otros componentes sin carga de una disolución acuosa. Como se ilustra en la **Figura 6**, un sistema de electrodialisis se conforma de un conjunto de membranas de intercambio iónico cuya permeabilidad es exclusiva para cationes (intercambio catiónico) y de membranas de intercambio iónico permeables únicamente para aniones (intercambio aniónico); dichas membranas se posicionan alternadamente entre dos electrodos y dan lugar a dos compartimentos, uno diluido y el otro más concentrado. Por el compartimento diluido se hace circular el afluente a tratar, mientras que por el compartimento concentrado se encuentra la disolución en la cual se depositan las altas cantidades de iones no deseados (CIDTA, 2003).

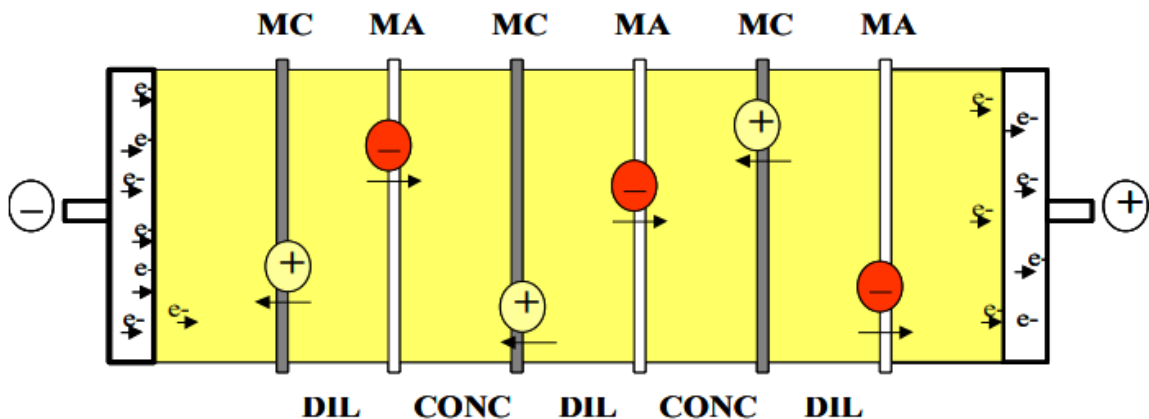


Figura 6. Esquema de módulo de electrodialisis. Fuente: López (2005).

Al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrodos, se obtiene una corriente eléctrica que pasa a través de la disolución y ocasiona la migración de los cationes hacia el cátodo (electrodo de cargado negativamente) atravesando la membrana de intercambio catiónico desde los compartimentos diluidos (DIL) hacia los concentrados (CONC), en los cuales quedan atrapados pues se interpone en su camino una membrana de

intercambio aniónico (MA). De manera análoga, los aniones fluyen a través de las membranas de intercambio aniónico (MA) hacia el ánodo (electrodo cargado positivamente) y se depositan en el compartimento concentrado ya que su migración es interrumpida por membranas contiguas de intercambio catiónico (MC) (*Figura 7*) (López, 2005). Los iones cargados se extraen de las membranas y se direccionan hacia los electrodos de cargas opuestas y finalmente se transfieren a los compartimentos de concentración adyacente, siendo un proceso de remoción continuo. Además, cabe mencionar que la corriente eléctrica también se utiliza para regenerar las membranas de manera continua, lo que elimina la necesidad de una regeneración periódica (LENNTECH, s.f. a).

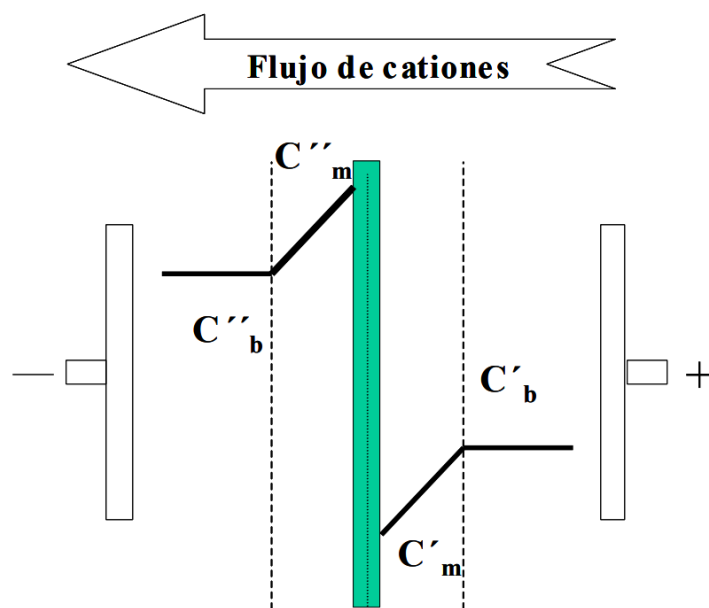


Figura 7. Polarización por concentración. Fuente: López (2005).

En la electrodiálisis, la purificación del agua o del disolvente ocurre por la eliminación de los solutos indeseables a través de la membrana por intercambio iónico, mientras que en el caso de la ósmosis inversa esto tiene lugar por el transporte selectivo del solvente que pasa por la membrana que rechaza al soluto por su tamaño y naturaleza química. Ambas técnicas han demostrado alta fiabilidad y eficacia para tratar caudales con características similares, particularmente en lo relativo a especies iónicas (sales) (López, 2005). No obstante, pese a que la electrodiálisis combina ventajas de selectividad, una baja demanda de reactivos (inclusive menor que la ósmosis inversa) y el porcentaje de recuperación de agua es mayor, se opta por un sistema de ósmosis inversa en la mayoría de las aplicaciones de la industria debido al costo inicial del equipo y al costo de operación (López, 2005).

1.3.3.1. Ventajas y desventajas del tratamiento de aguas por electrodiálisis

En la **Tabla 3** se recopilan las desventajas y ventajas de los sistemas de electrodiálisis para la remoción de partículas contaminantes de un efluente de agua.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del uso de un equipo de electrodiálisis para tratamiento de aguas.

Fuente: LENNTECH (s.f. a).

<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Operación simple y continua. ○ Regeneración de membranas continua sin necesidad de reactivos químicos. ○ Membranas altamente selectivas. ○ Confiabilidad y eficacia mayor al 95%. ○ Trabaja a presiones bajas. ○ Requiere de poco espacio físico. ○ Necesita de poco mantenimiento. ○ Brinda la completa eliminación de partículas inorgánicas disueltas. ○ En combinación con el pretratamiento de ósmosis inversa, elimina más del 99.9% de las sales del agua. ○ Se pueden utilizar a gran escala empleando más módulos con diseño paralelo.
<p>Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ No se recomienda utilizar para tratar caudales con muy altas concentraciones en sales pues deteriora el módulo. ○ No se puede utilizar para caudales con una dureza superior a 1 mg/L, debido a que el CaCO₃ generaría incrustaciones en el compartimento concentrado, limitando la operación. ○ Requiere de pretratamiento. ○ Alto consumo de energía. ○ Elevado costo inicial de equipo.

1.4. Humedales

Son ecosistemas, ya sea naturales o artificiales, que se encuentran temporal o permanentemente inundados por aguas dulces o salobres, estancadas o corrientes, que incluyen regiones ribereñas, costeras o marinas. Actúan como sistemas como tierras de transición entre sistemas terrestres y acuáticos, donde el manto freático se encuentra generalmente cerca de la superficie o bien, la tierra está cubierta por agua a una profundidad máxima de seis metros. Consisten en áreas de tierra cuyo suelo se halla saturado por la humedad dependiendo directamente de las condiciones climáticas del entorno. Al tratarse de ambientes ricos en biodiversidad y altos en productividad, exportan grandes cantidades de nutrientes del medio marino, fungen como zonas de desove, desarrollo y reclutamiento de invertebrados y peces, fungen como zonas de anidación para aves y mantienen control sobre la erosión costera e inundaciones. Aunado a lo anterior, los humedales junto con su vegetación, denominada como hidrófita, contribuyen a procesos inherentes a estos ecosistemas, tales como el abastecimiento de agua dulce, la producción de alimento, así como

la filtración y purificación del agua, ya que colabora con la retención de sedimentos y el ciclo de nutrientes como es el procesamiento de nitrógeno y fósforo (Ramsar, 2014).

Para la formación de un humedal se requiere de lluvia suficiente para que exista escorrentía o infiltración superior a la cantidad de agua que se evapora. Una vez que haya una acumulación en determinada topografía, ya sea una depresión, en un canal o sobre una superficie, el agua adopta un comportamiento hidrológico, esto quiere decir que, la cantidad, calidad estacionalidad de la inundación constituye el principal factor que produce un suelo hidromórfico y a su vez, determina el tipo de humedal. La ocupación de los poros del suelo por agua, en sustitución del aire, da lugar a la formación de un suelo hidromórfico donde la presencia de oxígeno resulta escasa, esto determina el tipo de plantas que se pueden implementar en el humedal. Otro factor que altera la formación de un humedal es la salinidad que produce heterogeneidad ambiental. Todo lo anterior tiene como resultado humedales herbáceos y arbóreos, temporales y permanentes, de agua dulce, salinos e hipersalinos (Moreno, 2012).

1.4.1. Humedales artificiales

Los *humedales naturales* consisten en zonas semiterrestres con un alto grado de humedad y con vegetación abundante, en ocasiones con presencia de agua, ya sean dulces o saladas, transitorias o permanentes (Domínguez, 2022). Por otra parte, los *humedales artificiales* son sistemas de ingeniería basados en la interacción biológica entre la vegetación y los microorganismos, además de sus interrelaciones con la química del suelo para brindar un tratamiento al efluente de interés. Tienen como objetivo remover o transformar los contaminantes en el agua a tratar por medio de una variedad de mecanismos físicos, químicos y biológicos. Los humedales construidos tienen grandes beneficios, como: un bajo costo de operación y mantenimiento, utilizan un mínimo gasto de energía, no necesitan de productos químicos, son muy eficientes y aportan un paisaje natural (Rivas, 2022).

Un humedal construido se distingue por dos zonas: la zona óxica, que contiene una alta proporción de material orgánico, y la zona anóxica, la cual es dominada por materia inorgánica. Las bacterias que provocan la oxidación de metales y la reducción sulfatos, que conllevan a la precipitación de óxidos de metales y sulfatos, actúan en las zonas óxicas y anóxicas, respectivamente (Corrales et al., 2015). Además, la baja velocidad del agua y el flujo laminar propician o auxilian a la remoción efectiva de sales (Andrade et al., 2010).

Hace más de 50 años se concibió el uso de sistemas de humedales artificiales provistos de la vegetación propia de los humedales naturales (ciénegas, pantanos, marismas, etcétera) gracias al trabajo de la doctora Seidel del Instituto Max-Planck en Alemania (Seidel, 1966). Seidel notó como el junco de laguna o junco lacustre (*Schoenoplectus lacustris*) podía reducir una gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en aguas contaminadas. Además, observó que ciertas bacterias, como coliformes, *Salmonella* y *Enterococcus*, son retenidas al pasar por la plantación de juncos de laguna. Asimismo, se registró una disminución de metales pesados e hidrocarburos. No obstante, fue hasta la

década de los setentas y ochentas que hubo un mayor interés en esta tecnología alternativa en Europa debido a los trabajos del doctor Kickuth (Kickuth, 1977), cuyos estudios se basaban en los procesos de tratamiento del agua urbana utilizando carrizo común (*Phragmites australis*) y fue en la década de los 90 que se empleó para tratar distintas aguas residuales industriales (Remtavares, 2015).

En las últimas décadas, el interés por los humedales artificiales se ha incrementado exponencialmente a nivel global, pues actúan como sistemas amortiguadores. Dicha capacidad se atribuye, entre otros factores, a su alta productividad de materia vegetal y microorganismos, los cuales facilitan la metabolización y remoción tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos. Asimismo, poseen una gran capacidad de retención y adsorción por medio de procesos físicos, químicos y biológicos que permiten eficazmente eliminar contaminantes de diversas fuentes. Estas características han convertido a los humedales en una opción atractiva para el tratamiento de caudales altamente contaminados, como los lixiviados generados en vertederos, un tema que sigue despertando mucho interés en el ámbito de la investigación (Cárdenas, 2012).



1.4.2. Clasificación de humedales

1.4.2.1. Según el tipo de vegetación utilizada para su operación

En la **Tabla 4** se abordan los tipos de humedales según las plantas empleadas de acuerdo a su operación.

Tabla 4. Clasificación de humedales según su operación. Fuente: Domínguez (2022).

Tipo de humedal	Descripción
Sistemas basados en micrófitas de hojas flotantes	<p>Aquellos cuyos órganos reproductores de su vegetación se encuentran flotando o sobre suelos anegados (inundados). Por ejemplo, el jacinto y la lenteja de agua.</p> <div data-bbox="696 1241 1140 1493" data-label="Image"> </div> <p><i>Lenteja de agua. Fuente: Escorihuela (2022).</i></p>
Sistemas basados en macrófitas sumergidas	<p>Suelen darse en zonas fóticas o eufóticas donde los sistemas se encuentran expuestos a poca luz y las partes responsables de la reproducción se hallan bajo el agua. Helechos, angiospermas, entre otros.</p>

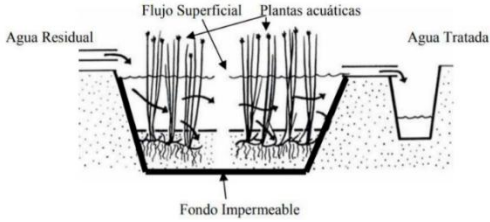
	 <p><i>Helechos acuáticos. Fuente: iStock (2023).</i></p>
<p>Sistemas basados en macrófitas enraizadas emergentes</p>	<p>Se propician en superficies inundadas, bien sea de manera temporal o permanente, donde los órganos reproductores son aéreos como las plantas perennes. A su vez, se pueden clasificar en: flujo superficial y flujo subsuperficial.</p>  <p><i>Totoras. Fuente: Wikipedia (2025b).</i></p>

1.4.2.2. Según el régimen del flujo del agua

Por otra parte, en la **Tabla 5** se visualizan los tipos de humedales de acuerdo a su clase de flujo de agua.

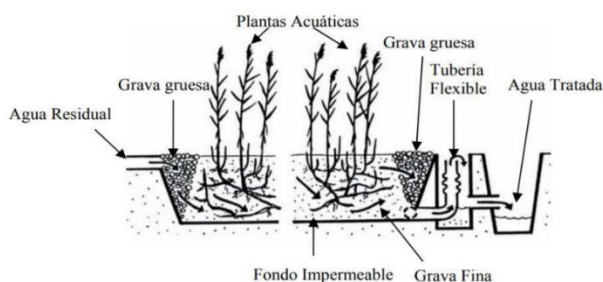
Tabla 5. Clasificación de humedales según su tipo de flujo. Fuente: Aburto & Luna (2014).

Tipo de humedal	Descripción
Flujo superficial	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sistemas inundados con espejo de agua expuesto al ambiente, acompañados de extensa vegetación acuática y la trayectoria del flujo es horizontal. ○ Consisten en canales de poca profundidad (0.1-0.6 m) construidas sobre el terreno con algún tipo de barrera que confine el sistema y evite filtraciones. ○ Contienen un lecho de grava o arena como soporte para las raíces de las macrófitas emergentes a través de los cuales fluye agua residual. ○ Se requiere de un diseño adecuado debido a la exposición del agua a la atmósfera para evitar problemas derivados

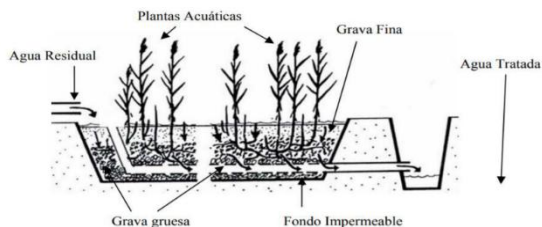
	<p>de una posible sobrecarga del sistema, como lo son el mal olor y plagas de insectos.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Se utilizan comúnmente para tratamientos terciarios y en medida, para secundarios. También se emplean para crear nuevos hábitats para la flora y fauna, inclusive, para mejorar las condiciones de humedales naturales futuros.  <p><i>Estructura de un humedal artificial horizontal de flujo superficial. Fuente: Domínguez (2022).</i></p>
Flujo subsuperficial	<ul style="list-style-type: none"> ○ En este tipo de sistemas el flujo de agua circula de forma subterránea, cuya ventaja es que el agua a tratar no queda expuesta al ambiente y favorece la remoción de cargas elevadas de contaminantes orgánicos. ○ Igualmente se trata de un canal impermeabilizado del exterior con material sólido granular (rocas o grava) como relleno ocupando casi toda su profundidad y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación. ○ La vegetación se planta en el medio granular y el agua entra en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. ○ La circulación del agua ocurre a través del material poroso y por debajo de la superficie del mismo, esto permite una mayor eficacia para muchos de los mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en los caudales a tratar. ○ En su sistema, existen zonas aerobias, anóxicas y una anaerobias. Las primeras se hallan muy cercanas a la superficie y alrededor tanto de las raíces como de los rizomas de las plantas. En dicha zona, los microorganismos se encargan de degradar la materia orgánica formando una biopelícula alrededor del medio filtrante y de las raíces de las plantas. ○ Requieren de menor área que los humedales de flujo superficial, pero son más costosos debido a que necesitan de mayor medio filtrante. ○ Dentro de este tipo de humedales, se encuentran dos tipos de flujos: horizontal y vertical. ○ Humedal de flujo horizontal: El afluyente ingresa de forma permanente por la parte superior de un extremo y es recogida por la parte opuesta inferior. El agua se trata a medida que fluye lateralmente a través del medio poroso,

cabe mencionar que no ingresa de manera directa con el medio granular principal, sino que se halla una zona de amortiguación normalmente formada por grava de mayor tamaño.

- Humedal de flujo vertical: El caudal ingresa de manera intermitente, de este modo, existen condiciones de saturación en la cama matriz seguidos de periodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno, es decir, de las condiciones aerobias. Reciben el efluente de arriba hacia abajo, logrando una infiltración vertical a través de un sustrato inerte (medio filtrante) y se recoge el agua en el fondo del humedal.



Estructura de un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial. Fuente: Domínguez (2022).



Estructura de un humedal artificial vertical de flujo subsuperficial. Fuente: Domínguez (2022).

1.4.3. ¿Qué sucede en un humedal artificial?

El funcionamiento de los humedales se basa en la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de la vegetación y el apoyo físico de un lecho inerte que opera como soporte para el enraizamiento de las plantas, además de actuar como material filtrante. En conjunto, estos elementos remueven materiales disueltos y suspendidos; asimismo, biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos. En un humedal artificial se ejecutan diferentes mecanismos de eliminación de contaminantes en un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos, por lo que la interacción de cada componente involucrado resulta ser bastante compleja (**Figura 8**). A continuación, se explica el mecanismo de eliminación de metales del efluente (Rivas, 2022).

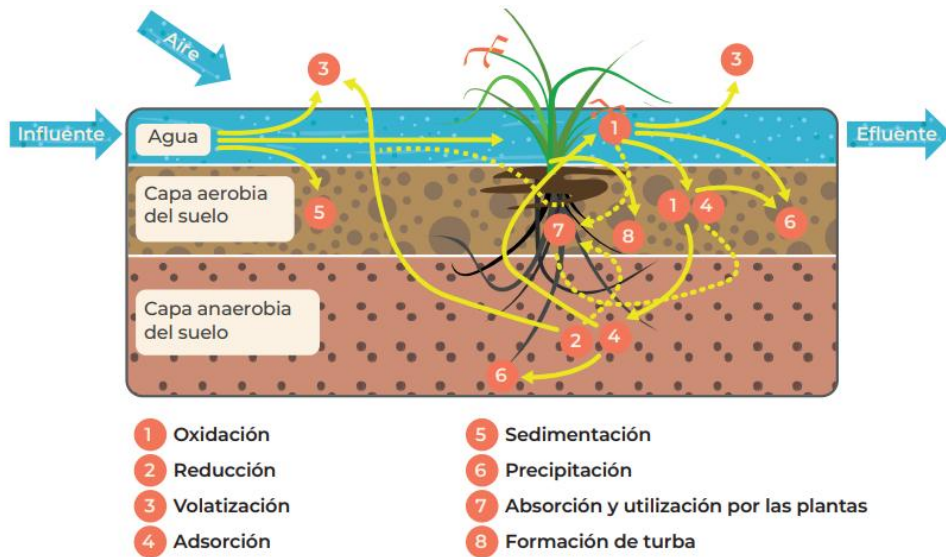


Figura 8. Mecanismos de remoción de contaminantes. Fuente: Rivas (2022).

Los metales se pueden encontrar en formas solubles, o bien, asociados a partículas, con las primeras como las formas más biodisponibles. Poseen una alta afinidad por la fitorremediación y la formación de complejos con material orgánico. La primera consiste en la adsorción cuyo proceso implica la unión de las partículas disueltas en partes de la planta o a la superficie de la matriz. Asimismo, el medio filtrante tiene la capacidad de retener metales mediante una reacción de intercambio catiónico, en donde los cationes metálicos se adhieren a los sitios cargados negativamente de la superficie de dicho medio filtrante gracias a la fuerza electrostática provocada por ambas cargas (Delgadillo et al., 2010).

1.4.4. Lecho filtrante

También denominado medio de soporte, corresponde al sitio en el cual se ubican las raíces de la vegetación y en donde suceden diversas reacciones físicas, químicas y biológicas que permiten la depuración de contaminantes de un caudal de agua a tratar. Además, proporciona una amplia superficie que facilita el crecimiento bacteriano y a su vez, actúa como medio filtrante (García et al., 2019).

Dentro de los medios más comunes para la elaboración de humedales artificiales se encuentra la arena gruesa y la grava fina. El tamaño de dichos materiales varía y oscila entre diámetros de 3 a 52 mm, manteniendo un tamaño aproximado de 50 mm en la zona de entrada para disminuir alguna posible obstrucción en el flujo de agua. Se recomienda colocar una capa de medio filtrante más fino, como lo es la arena, sobre una cama de grava para otorgar mayor estabilidad y arraigo de las macrófitas al medio (Villegas, 2019). No obstante, se han implementado otros medios de soporte, ya sea inorgánicos como la zeolita, la bauxita arcilla expandida, residuos de material de construcción, cuarcita, grava de brecha sedimentaria,

materiales plásticos, rocas etc.; u orgánicos, tal como conchas de ostras o astillas de madera (Pulla, 2024).

Recientemente, se ha examinado el potencial de carbón activado como medio filtrantes pues resulta ser un material versátil que adsorbe una diversidad de contaminantes provenientes de la atmósfera o del agua. Lo anterior se debe a su extensa área superficial, la cual se encuentra normalmente entre 30-3000 m²/g y a la estructura de sus poros que posee sitios adicionales por los cuales los contaminantes como compuestos orgánicos, metales pesados y nutrientes son adsorbidos constantemente durante largos periodos de tiempo (Karungamye, 2024). La principal característica de adsorción se debe a la propiedad de atracción y retención de contaminantes por medio de fuerzas de atracción de Van der Waals y de interacciones electrostáticas. Además, es resistente a un amplio rango de pH y a temperaturas extremas. Por tanto, la adición de este material a humedales artificiales incrementa la eficiencia del tratamiento de agua durante largos plazos (Chanda et al., 2023).

Por otra parte, la marmolina consiste en mármol triturado o molido en polvo fino y está constituido principalmente de calcita, es decir, una forma cristalina de carbonato de calcio (Vohla, 2011). La marmolina al ser rica en calcio, tiene la propiedad de remover fósforo (P) con gran eficacia, principalmente por medio de la precipitación y adsorción alcanzando remociones desde 75% hasta el 90% (Luna et al., 2004). No obstante, debido a su alto porcentaje de calcio en su composición, ocasiona un incremento en la conductividad eléctrica (Arias et al., 2001).

Las zeolitas forman parte de una clase de aluminosilicatos cristalinos que contienen aluminio, silicio y oxígeno en su armazón estructural. Además de cavidades, canales y poros definidos, a su vez, integran cationes metálicos y moléculas de agua, las cuales se desprenden de la estructura al aumentar la temperatura. Cabe mencionar que, las zeolitas tienen una coordinación tetraédrica formada por los átomos de aluminio y de silicio, a través de átomos de oxígeno compartidos por ambos (Calleja, 2009). Gracias a sus propiedades físicas y químicas, se utilizan a menudo en el tratamiento de aguas para la remoción de metales pesados, radioisótopos provenientes de caudales con residuos radioactivos, exceso de amonio (NH₄⁺), contaminantes orgánicos, en la reducción de sodio entre otros analitos. En esta última aplicación, el sodio puede almacenarse en la superficie o en las cavidades de las zeolitas provocado por una fuerza termodinámica que impulsa la difusión de los iones sodio (Na⁺) en la solución acuosa debido al gradiente de concentración entre la zeolita y la fase la solución. De la misma manera, una fuerza impulsa la difusión de iones Cl⁻ en la zeolita, lo que resulta en la acumulación de carga negativa en ella y de carga positiva en la solución. La primera difusión de iones genera una diferencia de potencial eléctrico que atrae a los cationes a la zeolita y los aniones nuevamente a la solución (Wen et al., 2018). Los cationes internos de la zeolita (Al³⁺ y Si⁴⁺) pueden intercambiarse con los cationes presentes en la solución, intercambio catiónico, lo que permite la remoción de diversos metales (entre otras especies químicas cargadas positivamente), pero en su mayoría sodio, potasio y calcio (Morante et al, 2021).

1.5. Planteamiento del problema

Desde hace un par de décadas, el desperdicio y escasez de agua potable ha suscitado especial atención alrededor del mundo, la cual no ha hecho más que aumentar junto con la crisis ambiental que se vive en el presente. Por ello, la comunidad científica se ha dado la tarea de encontrar vías y tecnologías novedosas que permitan el tratamiento de caudales contaminados y su posterior potabilización para consumo humano o para algún otro fin que permita un buen aprovechamiento y un reúso de este recurso en lugar de su desecho final en cuerpos acuáticos de manera equívoca, lo que contamina ecosistemas y daña su flora y fauna, además de atender el problema tanto social como económico que genera la carencia de agua.

Entre dichas tecnologías destacan los sistemas de ósmosis inversa que, por medio de membranas de características específicas, permiten retener un amplio espectro de contaminantes a bajo costo y con una alta eficacia, y han logrado posicionarse como uno de los procesos de potabilización de agua predilectos por plantas embotelladoras y de tratamiento de agua. No obstante, como se ha mencionado con anterioridad, el volumen de agua con altas concentraciones de contaminantes (en su mayoría sales) que producen estos sistemas resulta ser el doble del volumen de agua purificada obtenido, cuyo final en la mayoría de las plantas embotelladoras es el sistema de alcantarillado e inclusive, de manera igual de alarmante, el suelo o cuerpos de agua naturales sin algún tipo de tratamiento previo.

Ante la enorme problemática que pasa desapercibida por los responsables del equipo de ósmosis inversa, por figuras de autoridad y por la sociedad en general, aunado a la falta de estudios referente al tema, es que en este proyecto se propusieron diseños alternativos de proceso para la planta embotelladora de estudio llamada Dpura con la finalidad de disminuir el volumen producido de agua salitrosa por el sistema de OI, aumentar la pureza del agua producto y añadir más productos al catálogo de la empresa (agua destilada, bidestilada, agua tratada y sales recuperadas) para su comercialización y de esta manera, generar una economía circular que aproveche al máximo los recursos dentro del proceso de potabilización del agua.

1.6. Justificación

En una planta embotelladora de agua, el proceso de purificación comúnmente incluye las siguientes etapas: filtración, intercambio iónico, desgasificación de CO₂, ósmosis inversa, mineralización, radiación UV, ozonificación y llenado de botellas (Montero, 2016). En este procedimiento, se estima que se gastan 1.41 litros para producir 1 litro de agua embotellada según la Asociación Internacional de Agua Embotellada (IBWA, s.f.). No obstante, estos cálculos resultan de la producción directa sin tomar en cuenta el proceso de fabricación de los envases, que incluye el volumen de la extracción del petróleo a la resina y de su soplado para darle forma a la botella, así como, la fabricación de la tapa y de la etiqueta, que consumen en su totalidad una cifra estimada de 12.86 L (considerando el litro de su contenido y el proceso de purificación por OI); por otro lado, en caso del reciclaje de los envases se contempla el volumen de agua utilizada para el lavado y enjuague de los mismos, en lugar

de la huella hídrica de su fabricación, lo que da un total de 4.38 L gastados para la producción de un litro de agua purificada si se rellena un garrafón de 20 L (Montero, 2016).

De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), existen 30, 946 establecimientos dedicados a la actividad económica de acuerdo al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) 312112-Purificación y embotellado de agua en México, de los cuales 619 establecimientos se ubican en el estado de Hidalgo (INEGI, 2024). Para dimensionar la magnitud de la problemática, tomemos como ejemplo la planta embotelladora DPura que produce un aproximado de 40, 000 litros (40m^3) de agua purificada al mes (2, 000 garrafones de 20 L); lo anterior se traduce en un gasto total de 175, 200 litros de agua para la obtención de 2, 000 garrafones rellenos. Con base en el ejemplo y a los valores del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se calcula que las plantas embotelladoras del estado de Hidalgo consumen mensualmente un volumen alarmante de 108, 448, 800 litros de agua ($108, 448.8\text{ m}^3$) al reciclar envases y 318, 413, 600 litros de agua ($318, 413.6\text{ m}^3$) teniendo en cuenta la huella hídrica de la elaboración del envase, y esto sin contemplar plantas embotelladoras con mayor producción. Por ello, se busca contribuir y fomentar en la planta embotelladora DPura, la disminución de desperdicio de agua al reducir el volumen del efluente de agua salitrosa (producto secundario del sistema de ósmosis inversa), así como, el tratamiento de este por medio de tecnología ambientalmente amigable. Consideramos que, la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de este tipo de caudales, incrementa la calidad del agua residual y el bienestar de las comunidades locales, además de servir como ejemplo de tratamiento sostenible y redituable para otras plantas embotelladoras o plantas de tratamiento de aguas residuales.

1.7. Objetivos

1.7.1. General

Evaluar el reúso de aguas salitrosas provenientes de procesos de ósmosis inversa en plantas embotelladoras, tomando como modelo la planta embotelladora DPura localizada en Pachuca de Soto, Hidalgo.

1.7.2. Específicos

1. Determinar por medio de métodos espectrofotométricos y volumétricos la composición química de tres tipos de agua provenientes de la planta embotelladora DPura: agua producto, agua alcalina y agua salitrosa.
2. Con base en los resultados obtenidos, realizar propuestas de mejora del proceso que permita la remoción o disminución de salinidad en el agua de rechazo producida por el sistema de ósmosis inversa (OI) empleado en la planta embotelladora de estudio, junto con un análisis financiero para evaluar el costo-beneficio.
3. Diseñar y construir un humedal artificial cuyas propiedades y composición permitan remover sodio del caudal de agua salitrosa de manera eficiente.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Descripción de planta modelo

En primera instancia, se acudió el día 20 de marzo del 2024 a la planta embotelladora DPura ubicada en la colonia Bosques del Peñar, Pachuca de Soto del estado de Hidalgo, con la finalidad de tomar las siguientes tres muestras simples de un litro cada una: agua de rechazo o salitrosa, agua alcalina y agua producto. Del mismo modo, se tomaron notas y se realizaron diagramas acerca del equipo de ósmosis inversa y del diseño del proceso (*Figura 9*). Nuevamente en los meses de abril y agosto se realizaron muestreos simples para continuar con la determinación de los analitos de interés.

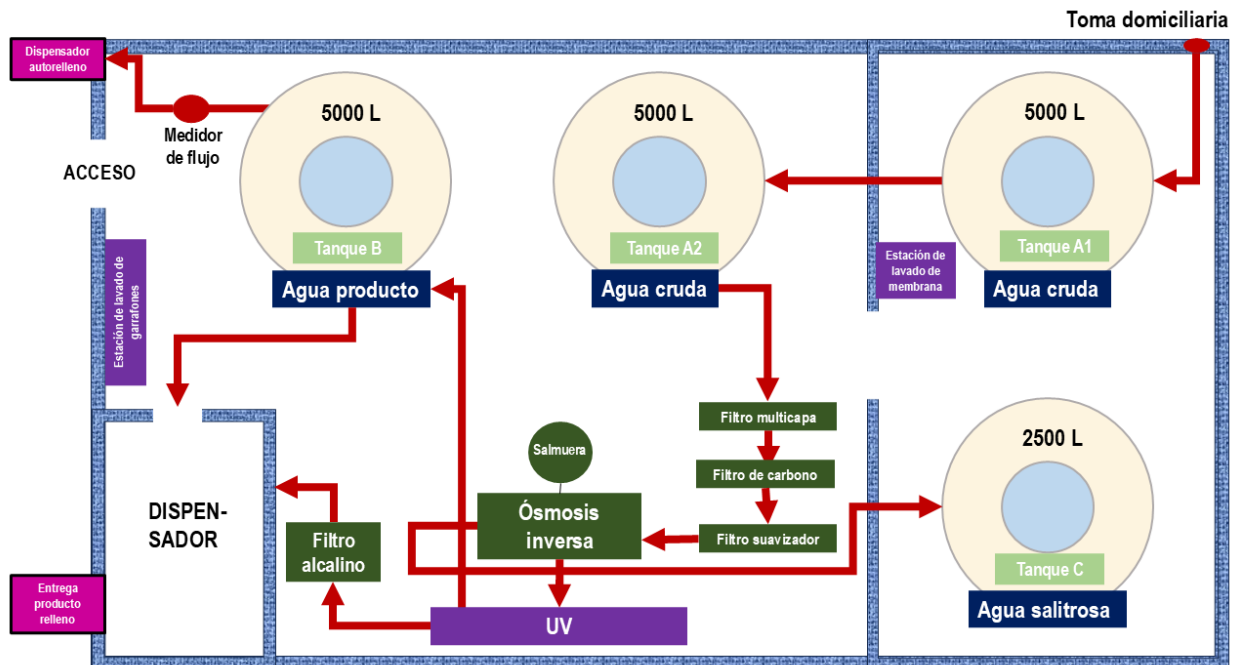


Figura 9. Distribución de sistema de purificación en planta embotelladora DPura. Fuente: Elaboración propia (2025).

En la imagen se visualiza que el caudal de entrada de agua sin tratar o efluente proviene de la toma domiciliaria, es decir, agua de llave o agua cruda, que se almacena en dos tanques con capacidad de 5,000 litros cada uno. Después de almacenarse en el tanque A2, el caudal pasa por el filtro multicapa, cuya tarea consiste en reducir el nivel de sólidos suspendidos, la turbidez, sedimentos, además de partículas grandes como la arena, arcilla, limo y materia orgánica de gran tamaño con la finalidad de evitar la obstrucción mecánica de la membrana (HydroTech, 2019). Posteriormente, el agua pasa a través de un filtro de carbón activado que permite remover cloro libre, cloramina, compuestos orgánicos volátiles (COVs) y mejora las características organolépticas (olor, color y sabor) (Market prospects, 2025). Después, fluye por el filtro suavizador, cuya labor es eliminar la dureza del agua para la mejora de su calidad y también, para evitar depósitos grandes de minerales sobre la superficie de la membrana. Una vez hecho esto, ingresa al sistema de ósmosis inversa, del cual surgen dos caudales, uno de agua purificada y otro de concentrado de sales. El volumen de agua salitrosa se almacena

en el tanque C para su posterior desecho en el sistema de alcantarillado, mientras que el agua purificada pasa por radiación UV como postratamiento, pues es capaz de inactivar una serie de microorganismos tales como las bacterias, virus, protistas, entre otros (Hydrotech, 2019). Finalmente, una fracción del caudal resultante a este tipo de protección se almacena y comercializa como agua producto, ya sea por medio del sistema de autorellenado de garrafrones o bien, en el dispensador, donde se empaqueta el agua haciendo uso de mangueras. Por otra parte, una fracción menor del agua purificada pasa por filtros alcalinizantes para generar agua alcalina, que igualmente se distribuye en el dispensador. Cabe mencionar que la planta embotelladora cuenta con una estación de lavado de membrana y una estación de lavado de garrafrones y de equipo.

2.2. Análisis químicos del agua

2.2.1 Determinación de conductividad eléctrica y pH

Al recibir las muestras se tomaron medidas tanto de pH como de conductividad eléctrica a cada una de ellas utilizando un potenciómetro Hanna Instruments y un conductímetro Thermo OrionStar, respectivamente.

2.2.2 Determinación de alcalinidad

Se llevaron a cabo las pruebas de alcalinidad a la fenolftaleína y alcalinidad total. La primera prueba se basa en la titulación de la muestra de agua con una solución H_2SO_4 0.02N, previamente valorada, usando como indicador fenolftaleína. Para determinar la alcalinidad total, se agrega el indicador naranja de metilo a las muestras ya tituladas y se continúa con la valoración hasta el nuevo cambio de vire. Se registran los volúmenes de gasto en ambas titulaciones y por medio de las *Ecuaciones 1, 2 y 3* se obtiene el valor de alcalinidad total (NMX-AA-036-SCFI, 2001). Se efectuó el mismo procedimiento por triplicado para las tres muestras diferentes de agua.

$$N_{H_2SO_4} = \frac{(\text{Peso del } Na_2CO_3) [g]}{(\text{Volumen de gasto de } H_2SO_4) [L] * (\text{Peso equivalente del } Na_2CO_3) [g/eq]} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Alcalinidad a la fenolftaleína (eq/L)} = \frac{(\text{Volumen de gasto } H_2SO_4) [mL] * (N_{real_{H_2SO_4}}) [eq/L]}{(\text{Volumen de la muestra}) [mL]} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Alcalinidad total (eq/L)} = \frac{(\text{Volumen de gasto } H_2SO_4) [mL] * (N_{real_{H_2SO_4}}) [eq/L]}{(\text{Volumen de la muestra}) [mL]} \quad (\text{Ec. 3})$$

2.2.3 Determinación de sulfatos

La determinación de sulfatos se realizó por turbidimetría, cuyo método consistió en la construcción de una curva de calibrado de sulfatos con siete soluciones estándar de 10 mL cada una en un intervalo de 0-40 ppm (5, 10, 15, 20, 25, 30 y 40 ppm), partiendo de una solución patrón de Na_2SO_4 anhidro 1000 ppm; se midió la absorbancia cada 30 segundos en un lapso de 4 minutos para cada estándar con ayuda de un espectrofotómetro a una longitud de 420 nm. La turbidez se logró cuantificar al hacer reaccionar la solución estándar con 1 mL

de disolución NaCl/HCl, 2 mL de disolución de glicerina-etanol y 0.05 gramos de cloruro de bario, dando como resultado el precipitado sulfato de bario y cloro gaseoso. Por tanto, se espera que la absorbancia y, por ende, concentración de sulfatos, aumente de manera directamente proporcional al tiempo.

Se construyó una segunda curva de calibrado que permitió cuantificar concentraciones menores en un intervalo de 0.1 a 1.0 ppm, utilizando estándares con concentraciones de 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8 y 1.0 ppm. Una vez más se repitió el proceso, pero esta vez, se tomó lectura de la absorbancia de cada muestra de agua por triplicado en alícuotas de 10 mL. Cabe mencionar que el agua salitrosa se midió en la primera curva de calibración, mientras que, el agua producto y alcalina se cuantificaron en la segunda curva, ya que contienen bajas concentraciones (NMX-AA-074-SCFI, 2014).

2.2.4 Determinación de sodio

De manera similar, en la determinación de sodio también se realizaron dos curvas de calibración directa para cuantificar tanto concentraciones altas como concentraciones bajas. Para esta técnica se empleó un electrodo de ion selectivo para sodio, lo que permitió una medición directa con ayuda de un potenciómetro que arroja valores en unidades de potencial (mV). En la primera curva de calibrado se partió de una solución madre NaCl 1000 mg/L para la elaboración de siete soluciones estándar (1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 mg/L), con el objetivo de cuantificar sodio en la muestra de agua de rechazo, pues se esperan altas concentraciones. Por otro lado, en la segunda curva de calibrado se optó por hacer las siete soluciones estándar (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.7 y 1.0 mg/L) a partir de la misma solución patrón, para la determinación de sodio en muestras con bajas concentraciones tales como: agua producto y agua alcalina (Metrohm, 2003).

2.2.5 Determinación de dureza

Se determinó la dureza total mediante volumetría utilizando ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) como titulante y negro de eriocromo T como indicador. Primero se llevó a cabo una valoración del titulante con 10 mL de disolución de carbonato de calcio y se registró el volumen de gasto de EDTA. Después, se colocaron 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se añadieron 2 mL de solución buffer de $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3^-$ con sal de magnesio (la sal tiene la finalidad de hacer la disolución inodora y más estable) para alcanzar un pH entre 10.0 y 10.1; finalmente se añadió el indicador y se tituló hasta obtener un cambio de vire de color rojizo a azul (NMX-AA-072-SCFI, 2001). Se realizó la técnica por triplicado a cada una de las muestras de interés y se cuantificó la dureza total con la *Ecuación 4*.

$$\text{Dureza total (mg CaCO}_3\text{/L)} = \frac{(\text{Volumen de gasto de EDTA}) [\text{mL}] * (\text{mg de CaCO}_3 \text{ equivalentes a 1 mL de muestra}) * 1000}{(\text{Volumen de la muestra}) [\text{mL}]} \quad (\text{Ec. 4})$$

2.3. Construcción del humedal artificial

Para la construcción del humedal artificial primero se estudiaron plantas capaces de soportar condiciones extremas de salinidad y principalmente, que se puedan nutrir de dichas sales para removerlas del caudal contaminado. Siguiendo estos criterios, se seleccionó la planta perenne perteneciente a la familia de las gramíneas llamada vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), pues es apta para crecer bajo condiciones adversas como temperaturas extremas (-15°C a 55°C), condiciones extremas de pH (3.3-12.5), así como, niveles altos de alcalinidad, acidez, salinidad y concentraciones elevadas de magnesio, sodio, aluminio, manganeso y metales pesados. El pasto vetiver tiene una alta tolerancia a los herbicidas y plaguicidas, además de poder crecer en suelos anegados. Gracias a sus propiedades, resulta ser ampliamente estudiado en biotecnología para el control de la erosión, fitorremediación de aguas y suelos contaminados por agroquímicos, metales pesados, hidrocarburos, entre otros (iNaturalist, s.f.).

Al mismo tiempo, se hicieron pruebas para la selección de los medios filtrantes más adecuados para el humedal artificial. Para los ensayos experimentales, se colocaron los siguientes materiales en orden de tamaño de partícula en una columna: residuos de concreto triturados, con la finalidad de brindar un segundo ciclo de vida a los desechos de la industria del cemento, carbón activado granular, geomembrana, suelo y vegetación. A través de la columna se hizo pasar agua salitrosa bajo un caudal, flujo y tiempo de retención hidráulico (TRH) determinado, y en base a la diferencia de conductividad eléctrica inicial y final (parámetro que permite evaluar variaciones en la concentración total de iones disueltos en el agua, incluyendo el sodio), se analizó que factores contribuyen a la reducción de salinidad o en su defecto, no adicionan la salinidad del efluente de estudio (**Figura 10**). Cabe mencionar que, el flujo adecuado también se halló experimentalmente manipulando la potencia de una bomba de flujo hasta encontrar la necesaria para hacer fluir 1 L de muestra en una hora.



Figura 10. A) Prueba a columna 1 y B) Prueba a columna 4. Fuente: Elaboración propia (2025).

En la **Tabla 6** se presentan las pruebas de flujo de acuerdo a la potencia de la bomba de flujo, el volumen y el tiempo de flujo o de riego deseado.

Tabla 6. Pruebas de flujo de riego. Fuente: Elaboración propia (2025).

Prueba	Potencia (unidades)	Volumen (mL)	Tiempo (min)
1	30	200	60
2	35	960	60
3	36	1000	60
4	38	1360	60
5	40	1380	60
6	50	2140	60
7	55	2600	60

Analizando los valores obtenidos, la potencia que se seleccionó para las pruebas es de 36 unidades, pues cumple con el objetivo planteado de hacer pasar 1 L en una hora.

Luego de que se seleccionaron los medios filtrantes, se consiguió un recipiente de plástico de dimensiones 44 x 18 x 15 cm con un volumen de 0.01188 m³ que funge como un humedal artificial a escala laboratorio; también, se le añadieron mangueras como tuberías de entrada, de distribución de agua y de salida. Se colocaron los materiales (previamente lavados, secados y pesados) de mayor a menor tamaño de partícula (de abajo hacia arriba); después se añadió una geomembrana, además de suelo recolectado de Mineral de la Reforma (previamente tamizado, secado y pesado) y finalmente 5 estiajes de pasto vetiver ubicados intercaladamente y a una distancia de 4.5 cm entre sí. De igual manera que con las pruebas de los medios filtrantes, se hizo pasar muestra de agua salitrosa por el sistema humedal bajo cierto caudal, tiempo de flujo y TRH calculado (**Ecuación 5**) hasta obtener una disminución en la conductividad eléctrica, es decir una remoción de sales. Cabe destacar que, en aquellas pruebas en las que el efluente recuperado mostraba un aspecto café, se decidió medir la absorbancia por duplicado como indicador de turbidez utilizando un espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm (A_{540nm}).

$$TRH = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)}}{\text{Caudal (m}^3\text{/hr)}} \quad (\text{Ec. 5})$$

En la **Tabla 7** se observa cómo se montó el humedal artificial construido.

Tabla 7. Montaje del humedal artificial. Fuente: Elaboración propia (2025).

Material	Peso seco (kg)
Residuos de concreto	1.7542
Carbón activado	0.6592
Suelo	4.6106
Peso total (kg)	7.0240

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis químico del agua

En las **Tablas 8 y 9** se recopilan los resultados de los métodos ya mencionados para la determinación de alcalinidad total y dureza total, así como la cuantificación de sulfatos y sodio. A su vez, se incluyen los límites permisibles del agua para uso y consumo humano de los sistemas de abastecimiento establecidos por la NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 8. Composición química de las muestras de agua producto y alcalina. Fuente: Elaboración propia (2025).

Muestra	Agua producto		Agua alcalina		Límite permisible ^A
	Valor promedio (\bar{X})	Desviación estándar (σ)	Valor promedio (\bar{X})	Desviación estándar (σ)	
pH	8.47	0.0150	8.86	0.0250	6.5 a 8.5
Conductividad eléctrica (ms/cm)	5.2	0.1000	5.5	0.0500	-
Alcalinidad a la fenolftaleína (eq/L)	2.8339×10^{-4}	1.6670×10^{-5}	3.6674×10^{-4}	0	-
Alcalinidad total (mg CaCO₃/L)	133.0555	1.2511	166.4270	0.4179	100 a 200 ^B
Sulfatos (mg/L)	4.0801	0.0342	6.8381	0.0289	400
Sodio (mg/L)	0.0695	0.0413	0.1133	0.0206	200 ^C
Dureza total (mg CaCO₃/L)	19.8114	0.9434	49.0568	1.8868	500

Tabla 9. Composición química de las muestras de agua salitrosa. Fuente: Elaboración propia (2025).

Muestra	Agua salitrosa		Límite permisible ^A
	Valor promedio (\bar{X})	Desviación estándar (σ)	
pH	8.39	0.0350	6.5 a 8.5
Conductividad eléctrica (ms/cm)	30.7	0.2000	-
Alcalinidad a la fenolftaleína (eq/L)	9.9275×10^{-4}	9.2500×10^{-6}	-
Alcalinidad total (mg CaCO₃/L)	166.4095	8.7426	100 a 200 ^B
Sulfatos (mg/L)	96.4755	0.1290	400
Sodio (mg/L)	11.8373	0.0413	200 ^C
Dureza total (mg CaCO₃/L)	36.7926	0.9434	500

^A Establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 (SSA1, 2021).

^B El límite máximo permisible de alcalinidad total en el agua para consumo humano no se menciona en la norma, pero se considera que un valor superior a 200 mg CaCO₃/L ocasiona incrustaciones e inferior a 100 mg CaCO₃/L provoca corrosión (Hanna Instruments, 2020).

^C Establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 (SSA1, 1994)

Según los valores de pH de las muestras, es congruente que el agua alcalina tenga el valor más alto de pH, y por ende, el valor de alcalinidad más grande (166.4347 mg CaCO₃/L). No obstante, cabe mencionar que no se trata de una regla pues el pH indica la concentración de iones de hidrógeno en una solución y demuestra si es ácida, neutra o alcalina; por otra parte, la alcalinidad mide la capacidad de una solución para neutralizar ácidos, esto quiere decir que nos indica la resistencia de la solución ante los cambios de pH y las principales especies químicas que aportan alcalinidad son los iones bicarbonatos (HCO₃⁻), carbonatos (CO₃²⁻) e hidroxilos (OH⁻). Esta relación se observa en la muestra de agua producto (pH 8.47), pues tiene un pH ligeramente mayor al del agua salitrosa (pH 8.39) pero su alcalinidad es menor (133.0596 mg CaCO₃/L), pues su capacidad amortiguadora o de neutralización de ácidos es menor.

El rango de alcalinidad que se espera para agua potable es de 30-400 ppm pero el intervalo ideal es de 150-200 ppm para evitar corrosión (a menor alcalinidad) y formación de cal (a mayor alcalinidad) (Mechenich & Andrews, 2004). Los resultados de alcalinidad total de todas las muestras de agua se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma.

El límite máximo permisible de sulfatos es de 400 mg/L (SSA1, 2021). No obstante, para consumo humano y uso doméstico, lo ideal son concentraciones inferiores a 250 mg/L (LENNTECH, s.f. b). Por tanto, todas las muestras de agua se encuentran dentro del intervalo de contenido permisible de sulfatos. Cabe mencionar que resulta congruente que las muestras de agua producto y agua alcalina presenten una menor concentración de SO₄⁻ en contraste con las muestras de agua salitrosa, pues las primeras derivan o son el resultado del proceso de tratamiento por ósmosis inversa.

Los resultados son concordantes entre sí, pues se espera que el efluente de agua de rechazo se encuentre más concentrado en sodio que las demás muestras; no obstante, tiene mucho menos presencia de dichos iones en comparación a lo que se había contemplado al principio.

Los valores determinados se consideran correctos, pues para producir agua alcalina se hace pasar el agua producto por cápsulas alcalinizantes que contienen iones Mg²⁺ y Ca²⁺, cuyas especies químicas son las principales responsables de la dureza en el agua. Por ende, resulta lógico que tengan una mayor dureza en comparación con las demás muestras.

Como se observa, ninguna muestra contiene una alta concentración de los parámetros medidos y tampoco excede el límite permisible reportado en la norma “NOM-127-SSA1-2021” (SSA, 2021). Por tanto, para el diseño de proceso se optó por añadir una tercera membrana de ósmosis inversa en vez de agregar un equipo de electrodiálisis para tratar el agua de rechazo, como se consideró inicialmente para una concentración alta en salinidad, ya que es más accesible según el análisis financiero (**Tablas 10 y 11**) y se considera suficiente para reducir la cantidad de sodio del caudal de descarte, puesto que resultó ser mucho menor a lo estimado previo a las pruebas.

3.2. Propuestas de mejora del proceso

Una vez que se recopilaron los resultados de los análisis, se evaluó la eficiencia del proceso de ósmosis inversa con base en la comparación de la composición química del afluente y del efluente. Posteriormente, se buscaron posibles maneras de reusar el agua salitrosa que cumplan con la normatividad del uso específico, de riego por ejemplo. Una propuesta inicial es tratar el agua salitrosa proveniente del equipo de ósmosis inversa por medio de un equipo de electrodiálisis y emplear el producto de dicho proceso para generar agua alcalina haciendo uso de filtros alcalinizantes (*Figura 11*). Sin embargo, durante este tratamiento también surge una corriente de agua de rechazo, la cual puede ser dirigida a un sistema de humedales con la finalidad de remover la salinidad de dicho caudal. El equipo de electrodiálisis (ED) nos ofrece una mayor remoción de sales y un menor volumen de concentrado o agua salitrosa, puesto que el equipo de OI rechaza el 66.66% en agua salitrosa, mientras que un módulo de ED rechaza el 50%. Es posible aumentar el porcentaje de agua purificada que se obtiene de dicho equipo configurándolo en operación *batch* (por lote), inclusive podría incrementar hasta un 95% con recirculación, pero empleando más módulos en posición de bancadas. Sin embargo, esto último no es muy rentable, pues implica la compra de más módulos, lo que es bastante costoso y probablemente resulte innecesario para el volumen del caudal que se genera en la planta embotelladora. Otra ventaja del equipo de ED, es que no utiliza productos químicos para su operación o mantenimiento y tampoco necesita de lavados de membrana, debido a que se regeneran solo gracias a la corriente de agua que fluye a través de ellas. No obstante, cabe mencionar que el consumo energético mensual se elevaría demasiado con respecto a un sistema de OI (López, 2005). A pesar de que el equipo de electrodiálisis posee un alto porcentaje de remoción de sales, tratar agua con una alta salinidad resulta riesgoso pues esto saturaría y dañaría el equipo muy rápidamente, el cual es muy costoso de acuerdo al estudio financiero. Por ende, pese a las grandes ventajas de tratamiento de agua, se descartó esta opción debido a la relación costo-beneficio, que se logra apreciar con el análisis financiero plasmado en la **Tabla 10**. Este se basa en la media de precios actuales del mercado y cotizaciones de proveedores internacionales, tal como Hella Water Treatment Equipment Technology Co, Ltd., YASA ET o Veolia Water Technologies, cuyas empresas se dedican principalmente a la fabricación y comercialización de equipos de electrodiálisis, entre otras tecnologías. Se solicitó asesoría y se seleccionó una serie de equipos que cumplieran con las características deseadas para tratar un caudal altamente salino y con la capacidad de la planta embotelladora de estudio, el promedio de los costos de los equipos elegidos se muestra en el presupuesto a continuación.

4	Medidor de flujo	\$2, 760
1	Mano de obra por instalación y materiales	\$4, 000
1	Equipo de destilación	\$19, 600
1	Insumos de humedal	\$1, 000
8	Plantas de humedal	\$700
Total		\$37, 060

Con base en el análisis financiero de las dos opciones propuestas y a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, se optó por considerar la adquisición de una tercera membrana de ósmosis inversa, en lugar de un equipo de electrodiálisis. Se decidió lo anterior debido a la gran diferencia de costos y a la baja salinidad en el agua de rechazo (menor de la esperada). Por tanto, resulta viable tratar el agua salitrosa mediante el mismo sistema de OI pero empleando una tercera membrana que genera poca cantidad de agua de rechazo; además, esta alternativa es mucho más costeaible pese al incremento de lavados de membrana, los cuales se reflejan en gastos económicos y en la producción de una corriente contaminante de productos químicos. De acuerdo a la naturaleza del caudal tratado, se decidirá si es posible pasarlo por los filtros alcalinizantes o si se puede implementar en el sector de la construcción. d otra parte, igualmente se busca tratar el agua salitrosa que resulta de la segunda membrana mediante un sistema de humedales construidos.

3.3. Pruebas preliminares de los materiales filtrantes

En la **Tabla 12** se aprecian las pruebas realizadas a los medios filtrantes y su capacidad de remoción de sales.

Tabla 12. Pruebas de medios filtrantes. Fuente: Elaboración propia (2025).

Columna	Medios filtrantes	TRH (H)	Conductividad inicial (mS/cm)	Conductividad final (mS/cm)	% de remoción
1	Marmolina, residuos de concreto y grava	2	31.6	31.6	0.00%
2	Marmolina, residuos de concreto y grava	2	31.5	31.4	0.32%

3	Marmolina, residuos de concreto y grava	2	31.5	32.2	Aumentó 2.22%
4	Marmolina, zeolita y grava	2	31.7	31.6	0.32%
5	Residuos de concreto y carbón activado	2	31.7	34.4	Aumentó 8.52%
6	Residuos de concreto y carbón activado	2	31.8	34.1	Aumentó 7.23%

De acuerdo con los resultados de las pruebas, las configuraciones basadas en marmolina, residuos de concreto y grava son contraproducentes, pues no facilitaron la disminución de conductividad eléctrica e inclusive, después de tres pruebas, comenzaron a incrementar la cantidad de sales en el caudal de agua en un 2.22%. Otro resultado similar ocurre con los residuos de concreto y el carbón activado, puesto que aumentó la conductividad eléctrica casi un 10% tras su implementación como medios filtrantes.

Tras las evaluaciones prácticas, podemos determinar que la grava, la zeolita y la marmolina permiten mantener constante la cantidad de iones dentro del volumen de agua, en otras palabras, no reducen la cifra de conductividad eléctrica pero tampoco añaden. En un estudio realizado en Mineral de la Reforma, Hidalgo se evaluó el potencial de una paleta vegetal para tratar aguas grises ligeras y se halló que esa misma selección de medios filtrantes sí consiguió una disminución en promedio de 11.6% en la conductividad eléctrica debido a la capacidad de adsorber iones de las zeolitas y hasta un 23.2% empleando específicamente *Chrysopogon zizanioides* como vegetación (Aguirre et al., 2023). En caso de otro estudio efectuado en Perú, se analizaron las plantas totoras (*Typha angustifolia*) y los berros (*Nasturtium officinale*) en la construcción de humedales artificiales junto con grava como medio filtrante para el tratamiento de efluentes de granja porcícola, alcanzando un porcentaje de remoción de salinidad de 36.55% utilizando la primera planta y un 23.80% con plantas de berros (Sánchez et al., 2021). Por otra parte, según una investigación bibliográfica por parte de la UNAM, la zeolita, el mármol triturado y la grava constituyen materiales filtro comúnmente utilizados para el sustrato de distintos tipos de humedales construidos debido a su tamaño y eficacia de adsorción de metales (Díaz, 2018).

Los medios filtrantes seleccionados a partir de las pruebas fueron residuos de concreto pues a pesar de no remover sales, proporcionan buena estructura al humedal y filtración para

otros contaminantes sólidos; también se escogió el carbón activado, ya que resulta necesario para adsorber la coloración del agua, aun cuando adiciona salinidad al efluente según las pruebas.

3.4. Montaje y operación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

Se llevaron a cabo ocho pruebas al sistema humedal subsuperficial horizontal a escala laboratorio bajo condiciones controladas, de las cuales tres se realizaron a flujo subsuperficial horizontal (*Figura 13*). Sin embargo, al notar un incremento en la conductividad eléctrica se optó por cambiar a un flujo subsuperficial vertical y añadir un quinto estiaje de vetiver (*Figura 14*). En la *Tabla 13*, se recopilan los resultados de dichas pruebas.

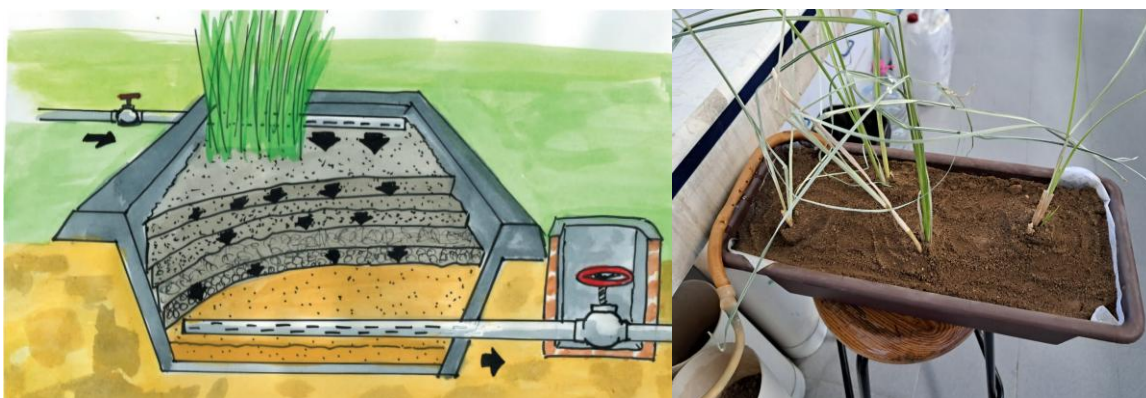


Figura 13. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: Rivas (2022), Elaboración propia (2025).



Figura 14. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical. Fuente: Rivas (2022), Elaboración propia (2025).

Tabla 13. Resultados de las pruebas experimentales a humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.
Fuente: Elaboración propia (2025).

Prueba	Tiempo de flujo (H)	TRH (H)	Caudal (m ³ /H)	Conductividad inicial (mS/cm)	Conductividad final (mS/cm)	% de remoción
1	1	12	0.001	31.7	31.9	-
2	2	6	0.002	31.7	39.8	-
3	2	8	0.0015	31.6	34.1	-
4	1.5	12	0.001	31.4	29.8	5.10
5	1.5	24	0.001	31.7	28.91	8.89
6	1.5	24	0.001	31.7	28.73	9.46
7	1.5	24	0.001	31.7	28.90	8.92
8	1.5	24	0.001	31.7	28.70	9.46

Como se puede observar, en las primeras pruebas hubo un aumento en la conductividad eléctrica; esto se considera normal pues a las plantas les toma tiempo adaptarse a las condiciones experimentales, aunado a que, el carbón activado en las pruebas de medios filtrantes añadió salinidad al efluente; no obstante, resulta necesario agregarlo para clarificar el agua. Se procedió a modificar el tipo, tiempo y potencia del flujo, además de incrementar el TRH, gracias a ello se obtuvo una reducción en la salinidad de hasta el 9.46%.

Es importante mencionar que en las pruebas 5, 6 y 7 se observó turbidez en el caudal resultante (**Figura 15**), la cual se midió en el espectrofotómetro y cuyas lecturas se visualizan en la **Tabla 14**. El aumento en la turbidez o en la aparición de coloración café, se atribuye a la filtración del suelo por la geomembrana, los medios filtrantes y las tuberías de salida gracias a la acumulación de agua por un tiempo más prolongado. Es decir, al incrementar el TRH y la frecuencia en que se realizan las pruebas, se aprecia una mayor turbidez. Una posible solución, sin tener que disminuir el TRH es añadir geomembrana en las tuberías de salida para que funcionen como filtros adicionales.

Tabla 14. Lecturas de turbidez en unidades de absorbancia. Fuente: Elaboración propia (2025).

Prueba	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia promedio
5	0.109	0.108	0.109
6	0.920	0.921	0.921
7	1.106	1.106	1.106

Tras la medición instrumental de las absorbancias, se identificó una tendencia creciente de los niveles de turbidez conforme al número de pruebas efectuadas al humedal artificial, lo cual sigue una progresiva saturación de dicho sistema, lo que conlleva a una mayor filtración de sustrato por las tuberías, pese a que se añadieron filtros de geomembrana en las mangueras.

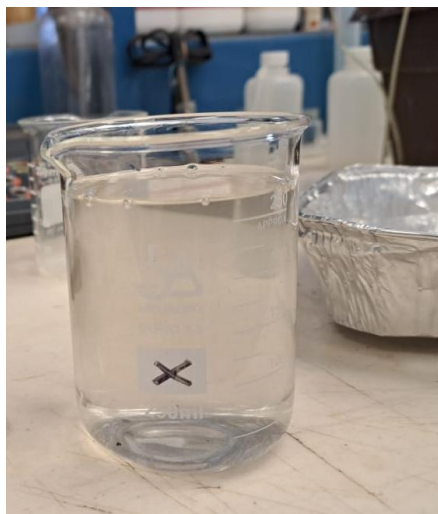


Figura 15. Coloración del efluente en la prueba 5 después de 24 horas. Fuente: Elaboración propia (2025).

Este estudio se centra en la remoción de salinidad, es decir, trazas de metales (iones) y los mecanismos de remoción pueden ser por asimilación por parte de las plantas, adsorción, complejación y sedimentación. Los metales traza, como el sodio, poseen una alta afinidad para la adsorción y complejación con material orgánico y tienden a acumularse en la matriz del humedal artificial (Delgadillo et al., 2010). En el caso de la adsorción, involucra sustancias disueltas en solución en partes de la planta o a la superficie de la matriz en donde ocurre una reacción de intercambio catiónico, cuyos iones metálicos cargados positivamente en solución se unen por fuerza electrostática a los sitios cargados negativamente en la superficie del material adsorbente (Delgadillo et al., 2010).

En cuanto al porcentaje de remoción de conductividad eléctrica obtenido en las pruebas experimentales, se considera bajo pues el mayor fue del 9.46%. Sin embargo, comparando con otro humedal subsuperficial horizontal construido en Cauca, Colombia para el riego agrícola con el agua tratada, se determinó una remoción global del 9.52%. Esto se puede adjudicar a la grava que se utilizó como medio filtrante, puesto que, es posible que la grava libere sales a medida que fluye el agua por el sistema debido a la fricción (Velasco & Vivas, 2006).

Para remover una mayor proporción de conductividad eléctrica se puede ampliar el área del humedal artificial, cambiar el medio filtrante o aumentar el tiempo de retención hidráulico. Esta última variable juega un papel importante, pues en un estudio elaborado en Irán, se construyó un sistema de 12 humedales horizontales de flujo subsuperficial en serie

utilizando las plantas *Salicornia europea*, *Salsola crassa* y *Bienertia cycloptera* con un tiempo de retención hidráulico de una semana, con el cual se alcanzó un porcentaje de remoción de salinidad de 20-35% (Farzi et al., 2017). Tomando en cuenta que nuestras pruebas fueron medidas con un TRH de hasta 24 horas, el nivel de eliminación de salinidad fue notoriamente eficiente. En el caso del medio filtrante, se podría emplear arcilla expandida (arcilla calentada a altas temperaturas), como se hizo en un estudio efectuado en Oporto, Portugal, cuya comparación fue entre tres tipos de sustrato (arcilla expandida, arena fina y anillos de Kaldnes desechados o K1 media procedentes del biofiltro de una granja de peces) cuyos análisis arrojaron resultados de hasta 31% de adsorción salina debido a la arcilla expandida con un TRH de 7 días (Jesus et al., 2014).

3.5. Modelo de economía circular: planta embotelladora Dpura

En la **Figura 16**, se visualiza el modelo de economía circular diseñado para la planta embotelladora de estudio. Con el modelo económico se pretende evitar que los residuos se desechen sin el tratamiento adecuado, por ello, se estableció que el 40% del caudal de descarte se incorpore al sistema de OI, otro 40% se aprovecha en el lavado de envases de garrafón y en la propia limpieza de las instalaciones de la planta embotelladora; el restante 20% se dirige a un sistema de humedales que trata el agua salitrosa y reduce la concentración de sodio para su posterior reincorporación en una tercera membrana de OI. El volumen producido de agua de doble rechazo en el segundo ciclo de ósmosis inversa se conduce hacia el humedal artificial y finalmente se riega en áreas verdes. Por otra parte, en el proceso de purificación de agua (40% de agua producto) se optimizan ganancias al obtener como subproductos agua alcalina (40%), agua destilada (10%) y agua bidestilada (10%). Con la intención de tener un diseño regenerativo, las sales recuperadas del proceso de destilación se emplean para el lavado de la membrana.

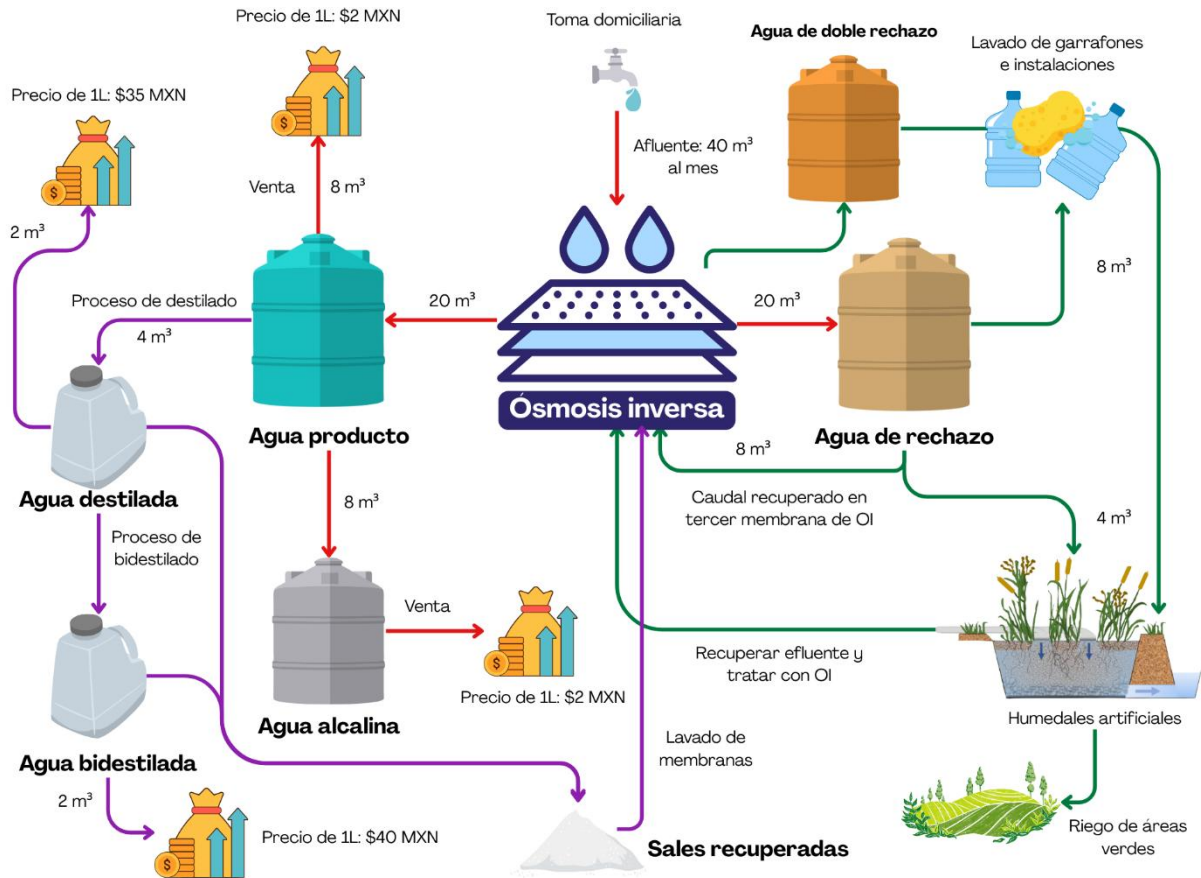


Figura 16. Modelo de economía circular: planta embotelladora Dpura. Fuente: Elaboración propia (2026).

Otro punto a resaltar es la sustitución de materias primas por secundarias en la construcción del humedal artificial al implementar residuos de construcción en el lecho filtrante. Por último, en la **Tabla 15** se expone la comparativa en el aspecto financiero al implementar estas medidas ecológicamente sostenibles.

Tabla 15. Ganancias con modelo lineal vs ganancias con modelo circular. Fuente: Elaboración propia (2026).

Producto	Modelo lineal	Modelo circular
Agua producto	\$24,000	\$16,000 + \$8,000 ^A
Agua alcalina	\$16,000	\$16,000
Agua destilada	-	\$70,000
Agua bidestilada	-	\$80,000
Total	\$38,000	\$190,000

^A Se consideran los 8 m³ del primer ciclo de OI y los 4 m³ resultantes del segundo ciclo de OI.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIÓN

Ante la alarmante situación hídrica que enfrenta el mundo entero, resulta necesario tomar acciones preventivas para la reducción del desperdicio y contaminación del agua, así como nuevas iniciativas para el tratamiento de las mismas. Debido a ello, en la planta embotelladora DPura, en la cual se emplea un equipo de ósmosis inversa para la potabilización del agua, se desea encontrar un reúso o tratamiento al gran caudal de agua salitrosa o de rechazo que genera dicho equipo en cada ciclo.

Para aportar una propuesta que disminuya la salinidad del agua de descarte fue necesario evaluar la calidad de este tipo de agua, así como de agua producto y agua alcalina. Una vez que se determinaron y analizaron los parámetros de alcalinidad total, dureza total, sulfatos y sodio, y se realizaron los análisis financieros correspondientes, se optó por añadir una tercera membrana al equipo de ósmosis inversa para recircular el caudal de agua de rechazo y el agua doblemente salitrosa producida en el segundo ciclo se hace pasar por un humedal artificial horizontal para remover la salinidad y buscarle un reúso como agua de riego, agua para la fabricación de materiales de construcción, entre otros. El humedal a escala laboratorio construido se conformó por estiajes de pasto vetiver, suelo, una geomembrana, carbón activado y grava. Tras la realización de pruebas experimentales y el ajuste de factores como: el tipo de flujo, tiempo y potencia de flujo, caudal y tiempo de retención hidráulico; es que se alcanzó una remoción en la conductividad eléctrica. A pesar de haber obtenido un porcentaje de eliminación más bajo a lo esperado, se comparó con la literatura y se califica como un nivel de remoción eficiente y altamente satisfactorio considerando la naturaleza del medio filtrante empleado. Así mismo, para las futuras pruebas se realizarán ajustes en los parámetros ya mencionados, así como en la extensión del área del humedal y en la proporción de la vegetación para reducir aún más la salinidad y poder descartar el agua de manera ambientalmente responsable, o bien, para darle un valor agregado a efluentes con características similares y se puedan reproducir este tipo de alternativas en otras plantas embotelladoras o negocios afines.

CAPITULO V. PERSPECTIVAS

En base a los hallazgos obtenidos en el proyecto de investigación desarrollado, se plantea realizar más pruebas al humedal artificial para incrementar el porcentaje de eliminación de sales explorando otros factores, tal como el tamaño del humedal artificial, pues al extender la superficie y el área de sustrato, existe una mejor distribución al momento del riego y una disminución en la saturación del sistema durante el tiempo de reposo operando con la misma potencia de riego y tiempo de retención hidráulico. Otra alternativa es evaluar la configuración del sistema posicionando por lo menos cuatro humedales artificiales en secuencia, pues de esta manera aumenta la eficacia al hacer fluir agua salitrosa por múltiples etapas de tratamiento en lugar de sólo una como fue el caso de este proyecto.

Con la finalidad de encontrar mejores resultados, inclusive se puede variar la vegetación de los distintos humedales sugeridos, basando su selección en la característica primordial de su supervivencia en condiciones extremas de salinidad y en su capacidad de alimentarse de ellas, tal como las halófitas y algunos ejemplos de estas son: arbusto salado (*Atriplex spongiosa*), plantas del género *Limonium* o *Tamarix*, la alacranera o sosa jabonera (*Arthrocnemum macrostachyum*), espárrago de mar (*Salicornia, sp.*), salicor (*Sarcocornia fructicosa*), cebada (*Hordeum vulgare*), orgaza (*Atriplex halimus*), entre muchas otras (González, 2022). El medio filtrante es otro factor que puede estudiarse aún más, ya que se empleó residuos de concreto para añadir estructura al sistema y para reutilizar material de desecho proveniente del sector de construcción; sin embargo, no fue de ayuda para la disminución en la conductividad eléctrica. En su lugar, se podría profundizar la investigación elaborando pruebas a otros residuos de material de construcción como los desechos de ladrillos, restos de hormigón o de yesos, junto con una capa de grava, de arena, de zeolita capaz de remover iones sodio y finalmente una capa de carbón activado.

Entre las pruebas fisicoquímicas que quedaron pendientes de ejecución en el presente estudio debido a la cuestión del tiempo de investigación, se encuentran: la determinación de la calidad del agua salitrosa tratada por la tercera membrana de ósmosis inversa, el análisis de producción de agua alcalina partiendo de agua salitrosa tratada, así como, la obtención de agua destilada y bidestilada a partir de esta misma, o bien, del agua producto inicial (agua potable comercializada). Conjuntamente, se busca evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua doblemente salitrosa tras pasar el sistema de humedales construidos en serie, además del proceso de recuperación de sales de este caudal para su reutilización en el mantenimiento de las membranas de ósmosis inversa, cumpliendo con una economía circular.

Este proyecto de investigación constituye una iniciativa que impulsa la búsqueda de soluciones a problemas que pasamos desapercibidos como dueños de negocios, como autoridades y principalmente, como consumidores. Promueve la responsabilidad que nos corresponde a cada uno de nosotros con el medio ambiente y nos permite reflexionar sobre posibles modelos o acciones que reduzcan al mínimo la liberación de caudales contaminados al suelo o al sistema de alcantarillado indiscriminadamente. A esto, se suma la integración del modelo de economía circular que tiene como propósito disminuir la generación de residuos y la demanda de materiales nuevos o recursos para la fabricación de algún producto,

a su vez, maximiza las ganancias del negocio. Es decir, pese al alcance de la investigación, ésta sirve satisfactoriamente como modelo de réplica para el sector comercial de potabilización del agua, así como para la fitorremediación de volúmenes de agua con altas concentraciones de sales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguapura (2015) *Ósmosis inversa 5 etapas con bomba: Manual de instalación y mantenimiento*. Fadecen S.L. <https://osmosis-inversa-domestica.com/wp-content/uploads/2015/04/Manual-instalacion-mantenimiento-Osmosis-Inversa-5-etapas-con-bomba.pdf>
- Aguirre, E., Lizárraga, L., Coronel, C., Tavizón, J. A. & Vázquez, G. A. (2023) Evaluación de una paleta vegetal apta para el tratamiento de aguas grises ligeras en soluciones basadas en la naturaleza. *Ingeniería del agua*, 27(3), 183-196. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.19554>
- Arias, C. A., Del Bubba, M. & Brix, H. (2001) Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Research*, 35(5), 1159–1168. Doi:10.1016/s0043-1354(00)00368-7
- Ayala, M. E., Peñuela, G. & Montoya, J. L. (2006) Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (38), 53-63. <https://www.redalyc.org/pdf/430/43003805.pdf>
- Bang, J.-H., Yoo, Y., Lee, S.-W., Song, K. & Chae, S. (2017) CO₂ Mineralization Using Brine Discharged from a Seawater Desalination Plant. *Minerals*, 7 (11), 207. Doi:10.3390/min7110207
- Bbagua (2020) *¿Cuánta agua desecha un equipo de Ósmosis Inversa?* <https://www.bbagua.com/blog/faq/cuanta-agua-desecha-un-equipo-de-osmosisinversa/#:~:text=La%20relaci%C3%B3n%20de%20rechazo%2Fproducto,cara%20del%20agua%20a%20tratar>
- Calleja, A. (2009) *La importancia de las zeolitas*. Universidad de Salamanca. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3760692.pdf>
- Cárdenas, C.A. (2012) *Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios*. Universidad de Sevilla. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70357/fichero/8.+ANTECEDENTES.pdf>
- CBR Ingeniería (2021) *Desalinización: el futuro para obtener agua potable*. <https://blog.cbr-ingenieria.com.mx/desalinizacion-el-futuro-para-obtener-agua-potable>
- Chanda, A., Duke, M., Jagadeesan, S., Muttill, N. & Singh, S. K. (2023) Production, types, and applications of activated carbon derived from waste tyres: an overview. *Applied Sciences*, 13 (1), 257. Doi: <https://doi.org/10.3390/app13010257>
- Chorong, A. & Richard, C. (2025) *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2025, Montañas y glaciares: torres de agua; datos y cifras*. UNESCO. <https://doi.org/10.54679/KQSF1046>
- CIDTA (2003) *Electrodialisis*. <https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Pasar/ELECTRODIALISIS.pdf>

- http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- CONAGUA (2019) *Estadísticas del Agua Día Cero México*.
https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA (2020) *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*.
<https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacionalhidrico-2019-2024-190499>
- CONAGUA (2025a) *Almacenamiento en presas del Sistema Cutzamala 2025*. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Dirección de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1019552/Agosto_2025.pdf
- CONAGUA (2025b) *Monitor de Sequía de México (MSM): Reporte de agosto 31 de 2025*. SMN.
<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20250831.pdf>
- COPARMEX (2024) *México en crisis por falta de agua*. <https://coparmex.org.mx/mexico-en-crisis-por-falta-de-agua/>
- Corrales, L. C., Antolinez, D. M., Bohórquez, J. A., & Corredor, A. M. (2015) Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13 (24).
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., Andrade, M. (2010) *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- De Miguel, C., Martínez, K., Pereira, M. & Kohout, M. (2021) *Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Díaz, E. J. (2018) *Humedales artificiales como sistema de tratamiento de aguas residuales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000778524>
- Dickinson, A., La Plante, E., Liu, Y., Simonetti, D., Hoek, E. M. V., Sant, G. & Jassby, D. (2025) *Reactive carbon capture using saline water: evaluation of prospective sources, processes, and products*. *Chemical Society Reviews*, 54(1), 116-151.
<https://doi.org/10.1039/D4CS00701H>
- Domínguez, O. (2022) *Los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales generadas en la zona baja de Belén en la ciudad de Iquitos*. Universidad Nacional Federico Villareal.
https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/6759/UNFV_EUPG_Dominguez_Villacorta_Orlando_Doradorado_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Escorihuela, E. (2022) *Los beneficios del mankai, la lenteja de agua: así los puedes aprovechar*. <https://abcblogs.abc.es/aula-nutricion/nutricion/los-beneficios-del-mankai-la-lenteja-de-agua-asi-los-puedes-aprovechar.html>

- Espwater (s.f.) *Alcalinidad. ¿Qué elimina un sistema de ósmosis inversa?*. <https://mx-espwaterproducts.glopalstore.com/what-does-a-reverse-osmosissystem-remove/>
- Farzi, A., Borghei, S. M., & Vossoughi, M. (2017). The use of halophytic plants for salt phytoremediation in constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 643–650. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1278423>
- García, J. A., López, G., & Torres, C. A. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 8(15), 16–51. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i15.82>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P. & Hultink, E. J. (2017) The Circular Economy-A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- González, A. F. (2022) *Especies halófitas de importancia agrícola como alternativa de biorremediación de suelos con problemas de salinización en Colombia*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. <https://repository.udca.edu.co/entities/publication/ce286b01-e130-46f0-85ec-d4eab74ef668>
- Guizard, C. (2011) *Técnicas membranarias de filtración de líquidos: Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa*. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes. <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S451B.pdf>
- Hanna Instruments (2020) *¿Por qué medir la alcalinidad en el agua potable?*. <https://h.hannainst.com.mx/blog/por-que-medir-la-alcalinidad-en-el-agua-potable/>
- Hernández, I. G., Ríos, I. M. & Torres, A. (2008) *Caracterización de equipo a nivel planta piloto*. Universidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14531/tesinaultima%5B1%5D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández, K. (2018) *Tratamiento de un efluente de la industria alimenticia utilizando procesos de membrana para la recuperación de agua*. Instituto Tecnológico de Toluca. <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4039/1/tesis-karina%20ultima%20correccion.pdf>
- Herrera, G. M. (2007) *Optimización de parámetros operacionales en unidad de ósmosis*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8350/3/CD-0672.pdf>
- HydroTech (2019) *Pre-treatment systems*. <https://hydrotechro.net/pre-treatment>
- IBWA (s.f.) *Environmental Footprint*. <https://bottledwater.org/environmental-footprint/>
- IDC (2025) *Crisis de agua en CDMX: Día cero podría llegar en 2028*. <https://idconline.mx/finanzas/2025/06/18/crisis-de-agua-en-cdmx-dia-cero-podria-llegar-en-2028>
- iNaturalist (s.f.) *Pasto vetiver*. <https://mexico.inaturalist.org/taxa/170196-Vetiveriazanioides>

- INEGI (2024) Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE).
Actividad económica: 312112-Purificación y embotellado de agua.
<https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- iStock (2023) *Azolla caroliniana* o helecho mosquito, helecho de agua.
<https://www.istockphoto.com/es/foto/azolla-caroliniana-o-helecho-mosquito-helecho-de-agua-es-una-peque%C3%B1a-planta-acu%C3%A1tica-gm1459109796-493550907>
- Jarabo, T. (2022) *Análisis de los sistemas de tratamiento de agua para el consumo humano y modelo de selección*. Universidad Pontificia Comillas.
<https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/64859/1/TFM-%20Jarabo%20Sastre%2C%20Teresa.pdf>
- Jesus, J. M., Calheiros, C. S. C., Castro, P. M. L., & Borges, M. T. (2014). Feasibility of *Typha Latifolia* for High Salinity Effluent Treatment in Constructed Wetlands for Integration in Resource Management Systems. *International Journal of Phytoremediation*, 16(4), 334–346. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.773284>
- Karungamye, P. (2024) The incorporation of activated carbon as a substrate in a constructed wetland. A review. *Cleaner Water*, 2, 100053.
<https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100053>
- Kickuth, R. (1977) *Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewaters by plant hydrosphere under limnic conditions*. Utilization of manure by land spreading, 335-368.
- Koseoglu, D. Y., Volkan, H., Coutinho, C. S., Krzeminski, P., Güçlü, S., Almeida, S., Surmacz, J., Plaza, E., Samaras, P., Binder, P. M., Hullebusch, E. D., & Devolli, A. (2023) Current challenges and future perspectives for the full circular economy of water in European countries. *Journal of Environmental Management*, 345.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118627>
- Lee, A., Elam, J. W. & Darling, S. B. (2015) Membrane materials for water purification: Design, development, and application. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(1), 17-42. <https://doi.org/10.1039/C5EW00159E>
- Lee, C.-H., Ho, H.-J., Chen, W.-S. & Iizuka, A. (2024) Total resource circulation of desalination brine: A review. *Advanced Sustainable Systems*.
<https://doi.org/10.1002/adsu.202300460>
- LENNTECH (s.f. a). *Electrodiálisis-EDI*.
<https://www.lenntech.es/processes/electrodialysis----edi.htm>
- LENNTECH (s.f. b) *Sulfatos*. <https://www.lenntech.es/sulfatos.htm>
- López, U. M. (2005). *Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua..pdf>
- Luna, V. M. & Aburto, S. (2014) Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en*

- Ciencias Químico-Biológicas*, 17 (1), 33-35.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v17n1/v17n1a3.pdf>
- Luna, V. M. & Ramírez, H. F. (2004) Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(1), 31-38. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020104>
- Market prospects (2025) *The Essential Role of Carbon Pre-Filters in RO Filtration Systems*. https://www.market-prospects.com/articles/the-essential-role-of-carbon-pre-filters-in-ro-filtration-systems?utm_source=chatgpt.com
- Mechenich, C. & Andrews, E. (2004) *Interpreting Drinking Water Test Results*. University of Wisconsin-Extension.
<https://aquaticanalytics.com/pdfs/Interpreting%20Drinking%20Water%20Test%20Results.pdf>
- Metrohm (2003) *Determination of sodium with the ion-selective electrode*.
https://www.metrohm.com/es_mx/applications/ab-application-bulletins/ab083.html
- Montaño, J. (2021) *Membranas de filtración para el tratamiento de aguas*. DINDEP. SJ Solución ambiental.
https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2021/04/Membranas_de_filtracion_para_el_tratamiento_de_aguas.pdf
- Montero, M. S. (2016) *Huella hídrica del agua embotellada y transformación del hábito de consumo de agua para beber en México. Caso de estudio, San Cristóbal de las Casas, Chiapas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2016/septiembre/0750398/0750398.pdf>
- Morante, F., Montalván, N., Carrión, P. & Espinoza, N. (2021) Cation exchange of natural zeolites: Worldwide research. *Sustainability*, 13 (4), 7751.
<https://doi.org/10.3390/su13147751>
- Moreno, P. (2012) *Los humedales en México: Oportunidades para la sociedad*. SEMARNAT.
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Humedales.pdf>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., & Munaretto, S. (2022) Circular Economy of Water: Definition, Strategies and Challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1463-1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- NMX-AA-036-SCFI (2001) *Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI_2001.pdf
- NMX-AA-072-SCFI (2001) *Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI_2001.pdf

- NMX-AA-074-SCFI (2014) *Análisis de agua – medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166149/nmx-aa-074_scfi-2014.pdf
- NOM-127-SSA1 (1994) *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969#gsc.tab=0
- NOM-127-SSA1 (2021) *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705
- OECD (2025) *The Circular Water Economy in Latin America. OECD Urban Studies*.
<https://doi.org/10.1787/a0508572-en>.
- Palacios, H., Hernández, J. A., Romero, V. H., Zurita, F. & Sulbarán, B. C. (2017) *Sistemas de tratamiento de aguas residuales por membranas. Innovación y Desarrollo Tecnológico*, 9(4), ISSN: 2007-4786. https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/02/4-3_sistemas-de-tratamiento-de-agua-residuales-por-membranas.pdf
- Salama, A., Alyan, A., El-amin, M., Sun, S., Zhang, T. & Zoubeik, M. (2021) *The Effect of the Oleophobicity Deterioration of a Membrane Surface on Its Rejection Capacity: A Computational Fluid Dynamics Study. Membranes*, 11, 253.
<https://doi.org/10.3390/membranes11040253>
- Sánchez, V. G., Palomino, P. A., & Malpartida, R. J. (2021) *Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias ALFA*, 5(14), ISSN: 2664-0902.
<http://portal.amelica.org/ameli/journal/540/5402509017/>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J. & Mayes, A. M. (2008) *Science and technology for water purification in the coming decades. Nature*, 452 (7185), 301–310. Doi:10.1038/nature06599
- Smol, M., Adam, C. & Preisner, M. (2020) *Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 682–697. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Peydayesh, M. & Mezzenga, R. (2024) *The circular economy of water across the six continents. Chemical Society Reviews*, 53(1), 1-28. <https://doi.org/10.1039/d3cs00812f>
- Pulla, J. D. (2024) *Estudio de la remoción de cafeína mediante el uso de humedales subsuperficiales de flujo vertical utilizando bagazo de caña como medio de soporte*. Escuela Politécnica Nacional.
https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25785/1/CD%2014497.pdf?utm_source=
- Ramsar (2014) *Humedales: ¿por qué cuidarlos?. Convención sobre los humedales*.
https://www.ramsar.org/sites/default/files/ficha_informativa_1-4_esp.pdf

- Ranjan, L., Yadav, D., Borah, D., Gogoi, A., Goswami, S., Hazarika, G., Karki, S., Borpatra, M., Sawake, S., Jadhav, S. V., Chatterjee, S. & Ingole, P. (2024) Polymeric Membranes for Liquid Separation: Innovations in Materials, Fabrication, and Industrial Applications. *Polymers*, 16(23), 3240. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym16233240>
- Remtavares (2015) *Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de residuales: Conceptos e historia*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/humedales-artificiales-como-sistemas-naturales-de-depuracion-de-aguas-residuales-conceptos-e-historia>
- Rivas, A. (2022) ¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela?. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, ISBN: 978-607-8629-33-6. <https://doi.org/10.24850/b-imta-2022-08>
- Ruiz, F. (2014) *Capítulo 2: Introducción a la ósmosis inversa. Desalación de agua de mar en planta termosolar de cilindro parabólico de 50 MW*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20407/fichero/2.CAPITULO+2.pdf>
- Siedel, K. (1966) Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen. *Naturwissenschaften*, 53(12), 289-297. <https://doi.org/10.1007/BF00712211>
- Vega, E. (2025) *Cada vez menos agua disponible en México*. Boletín UNAM-DGCS-218. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2025_218.html
- Velasco, A. M. & Vivas, Y. M. (2006) *Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/6655/Humedales%20artificiales%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villegas, E. C. (2019). *Remoción de fósforo y nitrógeno de aguas residuales domésticas, mediante humedales artificiales de flujo vertical empleando Antrasita y Tereftalato de Polietileno, en la localidad de Toma, Carhuaz – Ancash*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. <https://hdl.handle.net/20.500.14593/3557>
- Vohla, C., Koiv, M., Bavor, H. J., Chazarenc, F. & Mander, Ü. (2011) Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecological Engineering*, 37(1), 70–89. Doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.08.003
- Wen, J., Dong, H. & Zeng, G. (2018) Application of zeolite in removing salinity/sodicity from wastewater: A review of mechanisms, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 197(1), 1435-1446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.270>
- Wikipedia (2025) *Typha*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Typha>