

AGUA DE MAR: VALOR, TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO E IMPACTO SOBRE EL DESARROLLO ECONÓMICO DE ZONAS COSTANERA

Gaviria-Contreras E., Medellín-Fernández E., Anaya-Tatis, L.R.



**MT-Pallantia
Publisher**

Agua de mar:
Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre
el desarrollo económico de zonas costanera



MT-Pallantia Publisher s.a.s. | ISBN 978-628-95372-6-0
Cali - Colombia 2026

Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera

Enadis Gaviria-Contreras

Mindtech-RG. Mindtech s.a.s. Montería, Colombia.

Emiro J. Medellín-Fernández

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Montería – Colombia | Grupo de Investigación en Ingeniería, Innovación y Sostenibilidad (GIS). Solsosting s.a.s., Montería – Colombia.

Luis R. Anaya-Tatis

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Cali/Montería – Colombia | Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible e Innovación (GIDSI), Mindtech s.a.s., Montería – Colombia.



MT-Pallantia Publisher s.a.s. | ISBN 978-628-95372-6-0
Cali - Colombia 2026

Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera

Publisher: MT-Pallantia Publisher s.a.s. | NIT: 901.469.254-6

ISBN 978-628-95372-6-0

DOI: 10.34294/b.007.2026.05

Language: Spanish

Cali - Colombia 2026



This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright the publisher according to License CC BY-ND 4.0



Publisher:	MT- Pallantia Publisher s.a.s.
Editorial Project Manager:	A. García-Quintero
Production Project Manager:	A. García-Quintero
Cover Designer:	M.D. Palencia-Bolaños

Funds:

Mindtech s.a.s., Universidad del Valle, Universidad de Córdoba y al Departamento Nacional de Planeación de Colombia a través del Sistema General de Regalías por los recursos suministrados en el marco del proyecto BPIN 2020000100261: "Desarrollo de un Sistema de Tratamiento de Aguas Polímero-Membrana de Bajo Consumo Energético Adaptable a Familias Campesinas, Comunidades Rurales, Costeras y Agropecuarias de Córdoba". Mindtech s.a.s., la Universidad del Valle, la Universidad de Córdoba, Polymeiker s.a.s., MT-Solsosting s.a.s., Instituto de Ciencia y Tecnología Analítica Golden-Hammer s.a.s. por los fondos suministrados en el marco del proyecto MT-012025 (C.I. 71408 Univalle) - Convenio MT-AFICAT-202501.

Cite as:

Gaviria-Contreras, E.; Medellín-Fernández, E.J.; Anaya-Tatis, L.R. (2026) Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera. MT-Pallantia Publisher s.a.s., Cali – Colombia, pp. 127. DOI: 10.34294/b.007.2026.05



MT-Pallantia Publisher s.a.s. | ISBN 978-628-95372-6-0
Cali - Colombia 2026

Prólogo

Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera

Enadis Gaviria-Contreras
Emiro J. Medellín-Fernández
Luis R. Anaya-Tatis

Resumen Proyecto. El agua es un recurso de vital importancia para todas las actividades humanas, siendo importante no sólo su cantidad sino también su calidad y disponibilidad. En la actualidad, los tres factores anteriores son fuertes indicadores de riesgos y/o de bienestar que deben tenerse en cuenta si se quiere avanzar en el desarrollo sostenible tanto económico, como ambiental y social de las comunidades. Sin embargo, el cambio climático expone nuevos escenarios que impactan las tres características anteriores debido a la ocurrencia de sequías más prolongadas y mayores pérdidas del recurso por evaporación, lo que afecta no solo al sector productivo agropecuario y turístico sino también al sector salud. Por lo anterior, tecnologías dirigidas al aseguramiento del recurso hídrico en términos de cantidad, disponibilidad y calidad son una necesidad apremiante para todas las comunidades. Todo lo anterior aumenta la relevancia del proyecto si se tiene en cuenta que el departamento de Córdoba tradicionalmente se ha caracterizado por el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias, las cuales se ven enormemente potenciadas por la disponibilidad del recurso hídrico del departamento, definido por tres cuencas hidrográficas y aproximadamente 150.000 hectáreas de ciénagas.

Además, cinco municipios costeros con potencial turístico los cuales son Los Córdoba, San Antero Puerto Escondido, Moñitos, y San Bernardo del Viento. A partir de estas características es fácil establecer que el departamento debe

desarrollar estrategias adaptables a su realidad, que le permitan abordar la problemática de la escasez del recurso hídrico en sus comunidades, y aprovechar sus potenciales geográficos en pro de su desarrollo.

Como se mencionó anteriormente, el cambio climático ejerce una fuerte presión sobre el sector agropecuario y, en consecuencia, sobre los recursos hídricos mediante la generación de un aumento de la demanda y una disminución de la disponibilidad. Para la agricultura, esto se traduce, entre otras situaciones, en una disminución de la producción, mayor peligro de incendios forestales y erosión del suelo. En este sentido, el departamento de Córdoba, según los modelos del IDEAM, experimentará entre el 2011-2040 descensos significativos de lluvias estimados en un -35,5 % respecto a la media anual, lo que generará, en las condiciones actuales, desabastecimiento de agua para consumo humano en amplios sectores de la población urbana y rural, siendo esta última la más vulnerables al carecer de una infraestructura sólida de abastecimiento del recurso hídrico. Pero, además, se producirá déficit hídrico para las actividades agrícolas y ganaderas, dos de los ejes más importantes del departamento. Por otro lado, desde el punto de vista de salud pública, la disponibilidad de agua de calidad es un factor primordial para el desarrollo sostenible de las comunidades, estando lo anterior garantizado sólo en algunas de las ciudades principales del departamento, existiendo una alta vulnerabilidad en las zonas rurales y costeras.

En este contexto, es claro que el departamento de Córdoba posee diferentes características que lo hacen idóneo para ser seleccionado como punto importante para el desarrollo, evaluación e implementación de la tecnología de tratamiento de aguas propuesta en este proyecto, ya que esta tecnología se caracteriza por su configuración modular, de bajo costo energético y adaptabilidad a comunidades y diferentes escenarios. La solución planteada en este proyecto a los problemas anteriores es el uso eficiente del recurso hídrico, mediante la reutilización de este en sectores productivos ligados a este, el tratamiento de efluentes o cuerpos de agua de 8 zonas rurales no conectados a los sistemas de distribución central municipal, el potenciamiento de la cosecha de agua, y el aprovechamiento del agua de mar. Para ello, se requiere una tecnología adaptable, modular, escalable a diferentes niveles y, sobre todo, de bajo costo energético.

En este sentido, este proyecto se direcciona a la creación de sistemas autónomos de tratamiento de agua que no dependan de los sistemas convencionales de acueducto, pero que, a su vez, sean asequible a pequeños productores, y comunidades rurales dispersas. Para ello, la tecnología de membranas de retención en fase líquida asistida por polímeros, evolucionada a retención por membranas potenciada con polímeros funcionales soportados, emerge como una alternativa tecnológica viable y única en su naturaleza. Esta tecnología combina membranas de microfiltración con polímeros funcionales soportados que eliminan la carga iónica del efluente a bajas presiones de operación, siendo una estrategia diametralmente diferente a lo planteado por otras tecnologías de membrana como la ósmosis inversa que opera a muy altas presiones, o la retención en fase líquida asistida por polímeros que emplea polímeros solubles y membranas de ultrafiltración.

En particular, el punto clave tecnológico desarrollado ha sido llevar a cabo el tratamiento a un tamaño de corte de separación de iones cientos de veces mayor, posibilitando su adaptabilidad a costos muy inferiores que el de las tecnologías previas. Este proyecto no sólo se enfoca en fortalecer ejes productivos priorizados del departamento de Córdoba, así como los beneficios inherentes sobre las comunidades, sino que posiciona al departamento en el desarrollo de este tipo de tecnología para la expansión a otros departamentos de la zona caribe, donde, en principio, las problemáticas son similares y donde el efecto del cambio climático tendrá un fuerte impacto.

Editores

Enadis Gaviria-Contreras

Mindtech-RG. Mindtech s.a.s. Montería, Colombia.

Emiro J. Medellín-Fernández

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Montería – Colombia | Grupo de Investigación en Ingeniería, Innovación y Sostenibilidad (GIS). Solsosting s.a.s., Montería – Colombia.

Luis R. Anaya-Tatis

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Cali/Montería – Colombia | Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible e Innovación (GIDSI), Mindtech s.a.s., Montería – Colombia.

Lista de coautores

Bolaño-Vásquez Rafael A.

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Montería – Colombia.

Palencia-Bolaños Manuel D.

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Cali – Colombia. |
Unidad de Desarrollo Tecnológico en Nuevos Materiales (UDT), Polymeiker s.a.s.,
Montería – Colombia.

Pulido Rodríguez D. Camila

Mindtech Research Group (Mindtech-RG), Mindtech s.a.s., Cali/Montería –
Colombia. | Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible e Innovación (GIDSI),
Mindtech s.a.s., Cali/Montería – Colombia.

Contenido

1. Capítulo 1. Agua de mar como recurso generador de valor

Páginas: 13-51

- 1.1. Generalidades.
 - 1.2. Usos.
 - 1.2.1. Industrial.
 - 1.2.2. Acuícola.
 - 1.2.3. Energético.
 - 1.2.4. Extracción de minerales.
 - 1.2.5. Agrícola.
 - 1.2.6. Farmacéutico.
 - 1.3. Impacto de su uso.
 - 1.4. Contaminación.
 - 1.4.1. Contaminación por plástico.
 - 1.4.2. Contaminación por componentes químicos.
 - 1.4.3. Contaminación por metales pesados.
 - 1.4.4. Dispersión, acumulación e interacción entre contaminantes.
 - 1.5. Costos de producción.
 - 1.6. Relación con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible).
 - 1.6.1. Objetivo 14: Vida submarina.
 - 1.6.2. ODS 6: Agua limpia y saneamiento.
 - 1.6.3. ODS 13: Acción por el clima.
 - 1.6.4. ODS 12: Producción y consumo responsable.
 - 1.6.5. ODS 7: Energía asequible y no contaminante.
 - 1.6.6. ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.
 - 1.7. Conclusiones.
- Agradecimientos.
- Bibliografía.

Citar como: Pulido-Rodríguez, C.; Bolaño-Vásquez, R.; Palencia-Bolaños, M.D. Agua de mar como recurso generador de valor. En: Gaviria-Contreras, E. Medellín-Fernández, E.J.; Anaya-Tatis, L.R. Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera. MT Pallantia-Publisher, Cali – Colombia, 2026, 13-51. DOI: 10.34294/b.007.c1.2026.05

2. Capítulo 2. Tecnologías para el tratamiento de agua de mar

Páginas: 52-93

- 2.1. Introducción.
- 2.2. Tecnologías para el tratamiento de agua de mar.
 - 2.2.1. Sistemas de desalinización térmicos.
 - 2.2.1.1. Destilación multiefecto (MED).
 - 2.2.1.2. Flash multietapa (MSF).
 - 2.2.1.3. Compresión mecánica de vapor (MVC).
 - 2.2.2. Sistemas de desalinización basado en membranas.
 - 2.2.2.1. Ósmosis inversa (RO).
 - 2.2.2.2. Nanofiltración (NF).
 - 2.2.2.3. Electrodiálisis (ED).
 - 2.2.3. Sistemas de desalinización por cristalización.
 - 2.2.3.1. Desalinización por congelación (FD).
 - 2.2.3.2. Desalinización basada en hidratos (HBD).
- 2.3. Nuevos avances.
- 2.4. Usos a nivel Colombia de esas tecnologías.
- 2.5. Relación con los ODS.
- 2.6. Conclusiones.
- Agradecimientos.
- Bibliografía.

Citar como:

Palencia-Bolaños, M.D.; Bolaño-Vásquez, R.; Pulido-Rodríguez, C. Tecnologías para el tratamiento de agua de mar. En: Gaviria-Contreras, E. Medellín-Fernández, E.J.; Anaya-Tatis, L.R. Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera. MT Pallantia-Publisher, Cali – Colombia, 2026, 52-93. DOI: 10.34294/b.007.c2.2026.05

3. Capítulo 3. Desarrollo económico y productivo en el caribe colombiano a partir del agua marina

Páginas: 94-127

- 3.1. Agronomía marina.
 - 3.1.1. Acuicultura marina.

- 3.1.2. Cultivos de plantas con riego de agua de mar.
 - 3.1.3. Investigación y desarrollo en el caribe colombiano asociado con la agronomía marina.
 - 3.2. Desafíos agronómicos marinos.
 - 3.2.1. Desafíos asociados a la salinidad y al estrés osmótico.
 - 3.2.2. Limitaciones biológicas y selección de especies.
 - 3.2.3. Impactos ambientales y seguridad alimentaria en sistemas acuícolas.
 - 3.2.4. Gestión del agua y tecnologías de riego con agua de mar.
 - 3.2.5. Costos económicos y viabilidad productiva.
 - 3.3. Proyectos de desalinización en la costa caribe colombiana.
 - 3.3.1. Investigación científica y desarrollo tecnológico en desalinización.
 - 3.3.2. Proyectos estratégicos de desalinización para abastecimiento urbano: el caso de Santa Marta.
 - 3.3.3. Desalinización y sostenibilidad hídrica en territorios insulares: San Andrés, Providencia y Santa Catalina.
 - 3.3.4. Diseño de plantas desalinizadoras para contextos rurales y semiáridos: caso La Guajira.
 - 3.4. Relación entre la industria de minerales e hidrocarburos con el agua de mar.
- Agradecimientos.
Bibliografía.

Citar como: Bolaño-Vásquez, R.; Pulido-Rodríguez, C.; Palencia-Bolaños, M.D. Desarrollo económico y productivo en el caribe colombiano a partir del agua marina. En: Gaviria-Contreras, E.; Medellín-Fernández, E.J.; Anaya-Tatis, L.R. Agua de mar: Valor, tecnologías de tratamiento e impacto sobre el desarrollo económico de zonas costanera. MT Pallantia-Publisher, Cali – Colombia, 2026, 94-127. DOI: 10.34294/b.007.c3.2026.05

Capítulo 1

Agua de mar como recurso generador de valor

Camila Pulido-Rodríguez

Rafael Bolaño-Vásquez

Manuel D. Palencia-Bolaños

1.1. Generalidades

El agua es, por sí misma, una de las sustancias más notables y esenciales del planeta, cubriendo más del 70 % de la superficie terrestre en diversas formas: océanos, mares, ríos, lagos y glaciares. Su presencia es determinante para el desarrollo y mantenimiento de todos los organismos vivos, lo que la convierte en un recurso vital e irremplazable. De este total, aproximadamente el 97 % corresponde a agua de mar, mientras que solo el 3 % es agua dulce, considerada más apta para el consumo humano y el uso agrícola e industrial. Sin embargo, es importante resaltar los avances tecnológicos en tratamiento de agua salina, que han permitido aumentar la disponibilidad de agua para consumo.

A diferencia del agua dulce, el agua marina constituye una solución química significativamente más compleja, influenciada por factores como una menor concentración de oxígeno disuelto, una mayor salinidad, temperatura con mayor estabilidad, y es mucho más densa lo que le otorga una presión considerablemente mayor (Marín Romero, 2013). Su salinidad se origina principalmente en los procesos de erosión del suelo y de las costas, producto de la acción de las lluvias, que arrastran minerales y sales disueltas hacia los océanos a lo largo de miles de millones de años. Entre los principales elementos disueltos se encuentran el cloro,

el carbono, el azufre, el calcio, el potasio y el magnesio (ver **Tabla 1.1.**), los cuales se combinan para formar compuestos como bicarbonatos, sulfatos y cloruros, De estos, el cloruro de sodio es el más abundante, representando cerca del 80 % de las sales presentes en el agua de mar.

Tabla 1.1. Constitución de elementos del agua de mar en partes por millón.

Elementos	Composición en ppm	Elementos	Composición en ppm
Cloro	19500	Zinc	0,00500
Sodio	10800	Hierro	0,00340
Magnesio	1290	Uranio	0,00330
Azufre	904	Arsénico	0,00260
Calcio	411	Vanadio	0,00190
Potasio	392	Aluminio	0,00100
Bromo	67,3	Molibdeno	0,00100
Carbono	28	Titanio	0,00100
Nitrógeno	15,5	Cobre	0,00090
Flúor	13	Selenio	0,00090
Estroncio	8,10	Estaño	0,00081
Boro	4,45	Manganeso	0,00040
Silicio	2,90	Cobalto	0,00039
Litio	0,17000	Antimonio	0,00033
Yodo	0,06400	Cesio	0,00030
Bario	0,02100	Plata	0,00028
Níquel	0,00660	Otros	0,00070

El agua de mar contiene unas propiedades específicas físicas y químicas, originadas a partir de los elementos que la componen. Una de ellas es la salinidad, la cual corresponde a la cantidad de sales disueltas en el agua, y que a través de mediciones tomadas en varios lugares del océano se ha determinado que la salinidad promedio del agua de mar es equivalente a 35 gramos de sal disueltos por cada litro de agua (Kluth Campos, 20204). También tiene propiedades de electroconductividad, relacionadas con la cantidad de sales minerales disueltas en el agua y que generan iones capaces de conducir la corriente eléctrica, y que varían dependiendo la temperatura del agua (Solís, et al., 2018). En cuanto al oxígeno

disuelto del agua, este es un indicador determinante de la contaminación acuática, jugando un papel fundamental en el balance del ecosistema dado que los organismos lo necesitan para subsistir. En el océano, este se encuentra en la superficie en una medida de 6.7mg/L (Alvarado y Aguilar, 2009). La densidad y la temperatura también son características específicas del agua de mar. La densidad alcanza variaciones entre 1020 y 1050 kg/m³, determinadas por la temperatura, lo que quiere decir que, al disminuir la temperatura, esta puede aumentar (Xian, et al., 2023). La amplia disponibilidad del recurso inspiró al economista belga Gunter Pauli a introducir el concepto de economía azul, una propuesta que, aunque comparte principios con la economía circular en materia de sostenibilidad, se centra en el potencial productivo y regenerativo de los ecosistemas marinos. La economía azul promueve el uso responsable de los recursos oceánicos para fomentar el crecimiento económico, mejorar los medios de vida, generar empleo y, simultáneamente, garantizar la conservación de los sistemas naturales (Hoareau, 2025).

A nivel global, la implementación del modelo de economía azul ha impulsado el aprovechamiento del agua de mar en múltiples sectores, especialmente en países costeros. Los ámbitos de mayor desarrollo incluyen la acuicultura, el turismo, el transporte marítimo, las energías renovables y la biotecnología. En Europa, las actividades vinculadas a este enfoque generan alrededor de 500.000 millones de euros anuales, mientras que en Asia representan más del 7 % del Producto Interno Bruto (PIB) de países como China, Corea del Sur. En América Latina y el Caribe, el aprovechamiento del recurso ha trascendido la mera explicación productiva, orientándose hacia la restauración y conservación de la biodiversidad marina, contribuyendo así a la sostenibilidad de las cadenas de valor regionales.

1.2. Usos

La extensión del agua de mar permite el aprovechamiento de un recurso de amplia disponibilidad, además de la biodiversidad que se desarrolla dentro de sus ecosistemas. Por esta razón, los sectores en los que se aplica su uso se extienden al industrial, producción acuícola, turístico, farmacéutico, agrícola, minero y energético.

1.2.1. Industrial

El agua de mar tiene relevancia en el sector industrial ya que permite una mayor disponibilidad de agua que la que le es brindada por el agua dulce. Teniendo en cuenta su limitada disponibilidad, seriamente afectada por el crecimiento demográfico y el cambio climático, se presenta como una alternativa para el ejercicio industrial, satisfaciendo así la demanda.

Por esta razón, la actividad industrial más común por la que atraviesa el agua marina es el proceso de desalinización. El proceso busca eliminar la salinidad y los altos niveles de contaminantes del agua y convertirla en potable, disponible para el consumo humano, brindando accesibilidad al servicio a millones de personas que no cuentan con este. El proceso ha permitido una mejor resiliencia frente al cambio climático y la mejora en la accesibilidad del recurso, sobre todo en poblaciones vulnerables. La capacidad global acumulada de desalinización (Ver **Figura 1.1.**) se estimaba en 97,2 millones de m^3/d para febrero de 2020, y se prevé que supere los 200 millones de m^3/d para 2030 (Cipolletta et al., 2021; Eke et al., 2020; Mavukkandy et al., 2019), ampliando la disponibilidad de uso para otros sectores industriales como la transformación de materias primas.

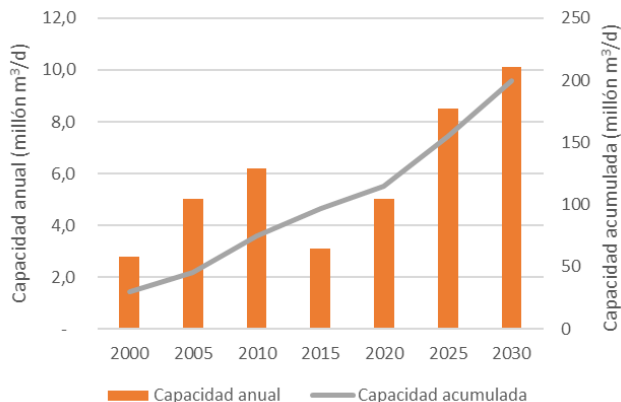


Figura 1.1. Capacidad de desalinización durante 30 años. Fuente: Elaboración propia.

En crudo, el agua de mar tiene ventajas y desventajas en la explotación minera, permitiendo la extracción de especies valiosas. Sus beneficios, al no incluir la desalinización, son la disminución de los costos de energía y de los efectos ambientales (Gálvez y Cisternas, 2017). Su uso en crudo y en desalinizado ha aumentado desde el año 2010 en países con alta actividad minera como Chile, y el uso de cada tipo depende de las características del mineral, los costos asociados y la adaptación de la operación minera a la composición del agua de mar cruda.

1.2.2. Acuícola

La acuicultura juega un papel importante en el fortalecimiento de la seguridad alimentaria, puesto que proporciona alimentos asequibles, especialmente en zonas con problemas de desnutrición gracias a sus eficientes ciclos de producción y su alto rendimiento. El agua de mar permite el cultivo de organismos de gran valor económico y nutricional como peces, mariscos y camarones, cuyo uso es característico de la alta cocina. Su aporte en componentes biológicos esenciales como polisacáridos, polipéptidos y sustancias bioactivas vitales para la salud cardiovascular humana, además de contar con propiedades antibacterianas y antitumorales (Zhang, et al., 2024; falta cita 14). El agua de mar potencializa la riqueza en proteínas, vitaminas y micronutrientes en los cultivos de peces, mariscos y algas, las cuales son importantes dentro del ciclo productivo.

La importancia del cultivo de moluscos y algas radica en su contribución a la sostenibilidad ambiental, ya que absorbe los desechos orgánicos y nutrientes, minimizando el impacto ambiental (Liu, et al., 2016). El sistema de acuicultura multitrofica integrada (AMTI) permite que el cultivo sea productivo, y combina de forma estratégica el cultivo de peces, camarones, moluscos, algas y otros organismos, creando así una cadena ecosistémica con diversos niveles nutricionales (Ver **Figura 1.2.**), cuyo funcionamiento cíclico aprovecha el agua de mar y los desechos de la cría de peces y camarones para el beneficio de los moluscos y las algas, y estas a su vez protegen el cultivo y el medio ambiente. Sin embargo, presenta desventajas, entre las que están la dificultad técnica inherente al manejo de peces, algas y moluscos al mismo tiempo, la sincronización adecuada de los ciclos de desarrollo en múltiples especies y el riesgo de contaminación cruzada. Además, desde el punto de vista económico requiere una inversión inicial

alta, así como condiciones del mercado heterogéneas. Otros aspectos críticos son los riesgos biológicos de atracción de depredadores, biofouling, entre otros.

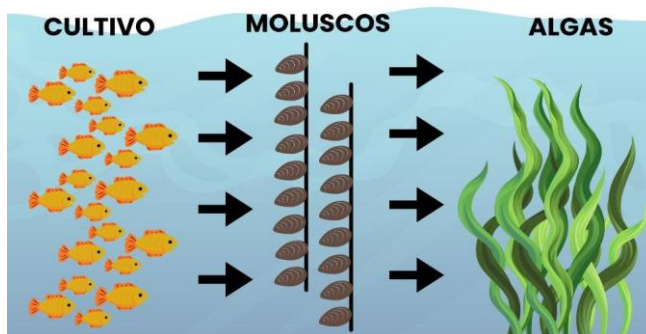


Figura 1.2. Acuicultura Multitrófica Integrada. Fuente: Elaboración propia.

1.2.3. Energético

El agua de mar ha introducido una nueva alternativa de energía limpia, consolidándose como una solución viable a dos retos: el aumento de la demanda energética y la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero. La energía marina (EM) comprende sistemas que aprovechan la energía mecánica contenida en el oleaje, las corrientes, las mareas, la temperatura y la salinidad del océano, lo que le otorga un alto potencial dentro de la transición energética (D'Anna y Wade, 2025; Afanador, et al., 2023). Estas tecnologías transforman el movimiento y las variaciones naturales del océano en electricidad mediante convertidores específicos y diseños optimizados para condiciones marinas.

La energía undimotriz y mareomotriz se han destacado por su desarrollo tecnológico. Ambas son impulsadas por el oleaje, originado por la acción del viento sobre la superficie del mar, y que constituyen una concentración significativa de energía, con variaciones según la altura y longitud de las olas (**Figura 1.3.**). En regiones como la costa escocesa y el mar del Japón, se han evidenciado escenarios favorables para su aprovechamiento, satisfaciendo las necesidades

originadas por las pocas reservas de combustible fósil y la desconfianza hacia la energía nuclear (Díez, 1997). Estos sistemas convierten el movimiento de las olas en energía mecánica y posteriormente eléctrica, transportada hacia tierra mediante subestaciones.

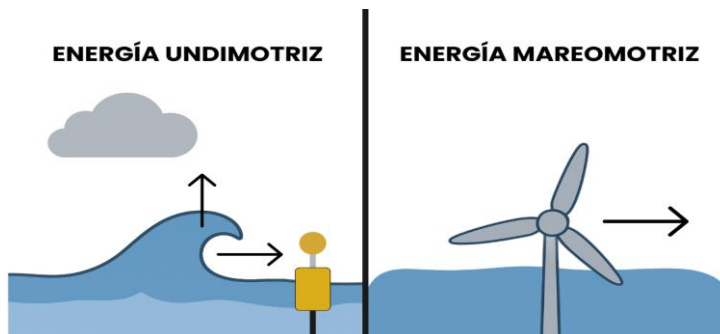


Figura 1.3. Acción de las olas de mar para la generación de energía. Fuente: Elaboración propia.

Además de la captación directa de energía oceánica, el agua de mar desempeña un papel creciente en la producción de hidrógeno mediante electrólisis. A diferencia del agua dulce, el agua de mar representa un recurso ampliamente disponible, siendo una materia prima estratégica para la generación de hidrógeno en regiones costeras e insulares (Kumar, et al., 2025). Aunque la electrólisis directa enfrenta desafíos asociados a las sales y compuestos presentes en el agua marina, los avances recientes en materiales, catalizadores, membranas y recubrimientos han permitido mejorar el desempeño y la estabilidad de estos sistemas.

Así mismo, la expansión de las energías renovables marinas, como la energía eólica marina y la energía oceánica en general, ha fortalecido el papel del agua de mar como un componente fundamental en la planificación energética costera. La energía eólica marina es la tecnología de mayor despliegue comercial, mientras que la energía de las olas y mareas continúan avanzando en madurez y capacidad de integración en sistemas energéticos diversificados (Duah, et al., 2025).

1.2.4. Extracción de minerales

Los recursos minerales del océano se clasifican en tres grupos: el agua, las sales disueltas y los minerales del suelo y subsuelo marino. Los 1.338 millones de kilómetros cúbicos de agua oceánica cuentan con la más grande reserva mineral de la tierra, cuya proporción es de 35 millones de toneladas de sólidos por cada 1.025 millones de toneladas de agua (Díez, 1997).

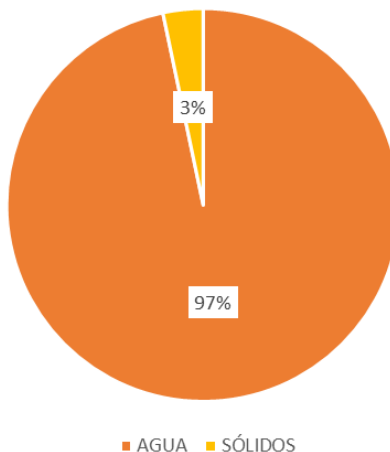


Figura 1.4. Proporción de sólidos en agua de mar. Fuente: Elaboración propia.

Desde el subsuelo marino se comprende una variedad de depósitos de origen químico y sedimentario que se distribuyen desde la plataforma continental hasta las zonas abisales. A nivel superficial es posible identificar las fosforitas sedimentarias, y hacia los llanos abisales, los nódulos polimetálicos de manganeso (Díez, 1997). También es posible identificar metales dispersos como la barita, hierro, manganeso, zinc, cobre, plomo, plata y oro. En cuanto a otros materiales, y aunque el océano alberga más de 70 elementos químicos disueltos, solo la sal, el magnesio y el bromo se extraen de forma rentable. Otro de los minerales extraídos del agua de mar es el uranio, ya que esta contiene más de cuatro mil millones de toneladas del elemento (Mayhew, 2018).

Esto supera significativamente el suministro que permite las actividades mineras en la tierra, y además permite una alternativa sostenible y ecológica para complementar el abastecimiento mundial de uranio.

1.2.5. Agrícola

En la actividad agrícola, el uso del agua de mar se da después del proceso de desalinización. Gracias a tecnologías como la destilación térmica, que permite tratar grandes volúmenes de agua, la electrodiálisis y la ósmosis inversas, que se basan en el uso de membranas (Ver **Figura 1.5.**), es posible realizar el tratamiento del agua para desalinizarse y ser aplicada en el cultivo (Beltrán & Koo-Oshima, 2006).

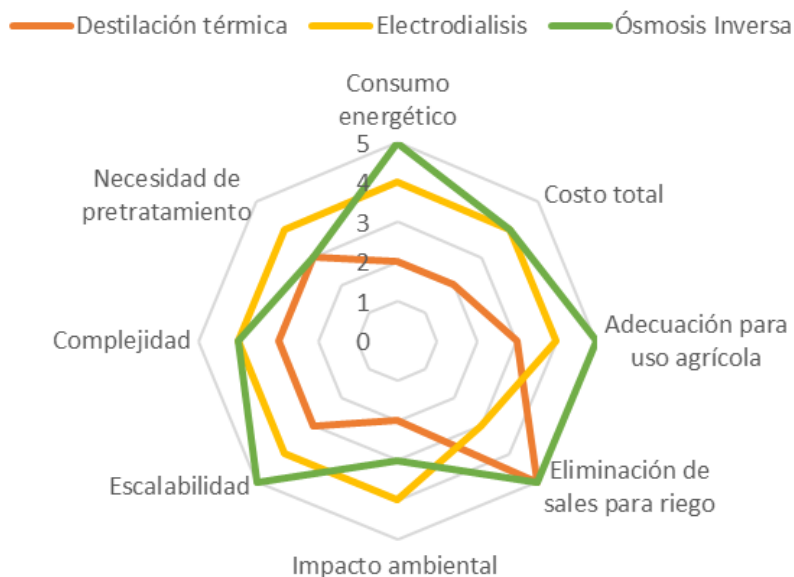


Figura 1.5. Comparativa de tecnologías de tratamiento de agua para uso agrícola. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, se ha comprobado que el riego con agua de mar puede actuar como fertilizante y plaguicida, ya que los minerales del recurso marino pueden ayudar para la vida de las plantas, como el sodio y el cloro (Agronegocios, 2024). Algunos países ya se encuentran aplicando esta metodología con resultados favorables (ver **Tabla 1.2**).

Tabla 1.2. Países que usan el agua de mar en el sector agrícola (Rodrigo, 2008).

País	N° sitios/país
Eritrea	1
Emiratos Árabes	4
Arabia Saudita	2
Omán	2
India	1
Canadá	2
Nicaragua	1
USA	10
Túnez	1
Qatar	2
Líbano	1
Alemania	1
Australia	4
Colombia	1
Inglaterra	4
Pakistán	3
Kuwait	1
Egipto	2
China	15

Cabe aclarar que el uso del agua de mar en el cultivo no debe realizarse en crudo, sino que es necesario que se combine con el agua dulce o agua de riego, puesto que las plantas responden al recurso hasta una cierta concentración, sin afectaciones (Javeed, 2021). Los resultados de diversos estudios sobre el agua de mar en vegetales mencionan el uso de agua de mar diluida como un agente que fortalece los cultivos hortícolas y mejoran el estado nutricional de los alimentos (Postel, 1999).

Es importante mencionar que, aunque se mencionan sus beneficios en el cultivo, no todas las especies productivas responden de igual forma al método y aún la información compilada no es suficiente para emitir juicios, sobre todo en materia nutricional y de calidad, sin embargo, se estiman efectos positivos en más de 130 especies de cultivos.

1.2.6. Farmacéutico

El agua de mar no solo ha sido potencial para ser empleada en el ámbito farmacéutico y terapéutico para diversas aplicaciones clínicas debido a su composición rica en minerales y oligoelementos. Uno de sus usos más antiguos se relaciona con su administración subcutánea como coadyuvante en tratamientos de difícil manejo, para la recuperación o disminución de síntomas ante enfermedades crónicas o debilitantes (Stevens, 1913).

En el campo de la otorrinolaringología, el agua de mar ha demostrado resultados en su uso en soluciones salinas estériles destinados a la irrigación nasal. Sus formulaciones facilitan la eliminación de secreciones, reducción de la congestión y el restablecimiento de la mucosa. Su alta tolerancia ha facilitado el tratamiento de afecciones del tracto respiratorio superior (Benedí & Romero, 2006; Stanfel et al., 2022). Estos lavados constituyen una alternativa sencilla, segura y efectiva frente a otras soluciones fisiológicas comerciales (Sanabria et al., 2020).

Por otra parte, el agua de mar forma parte de la talasoterapia, un enfoque terapéutico integral que emplea recursos marinos en aplicaciones hidroterapéuticas para inducir efectos relajantes, tonificantes y revitalizantes (Camejo et al., 2011). Derivado de esto surgen las ampollas de mar microfiltradas que permiten la rehidratación y reposición electrolítica para mejorar el rendimiento físico.

1.3. Impacto de su uso

El aprovechamiento del recurso marino presenta implicaciones económicas, sociales y ambientales, que varían según el sector en el que se emplee. Estas implicaciones pueden ser beneficiosas o negativas, y dependen de las tecnologías

utilizadas, la escala de explotación y las prácticas de manejo implementadas. Su impacto, tanto positivo como negativo, ha abierto posibilidades a encontrar diferentes utilidades para un recurso con tan amplia disponibilidad, y así mismo, las regulaciones correspondientes para que su manejo sea apropiado.

En este contexto, la desalinización es el proceso de mayor impacto en el que se usa el agua de mar. El proceso consiste en producir agua potable a partir de agua de mar, disminuyendo así el contenido de sales y acercándola al uso doméstico y de sectores productivos como la agricultura, mitigando el impacto que genera la escasez de agua dulce, impulsada por la sobreexplotación y el aumento demográfico, el cual se prevé que alcance los 8.500 millones de personas para el año 2030 (Zhao et al., 2024; Yan et al., 2025). Este proceso, que incrementa la disponibilidad del recurso hídrico, permite impulsar la productividad de todos los sectores económicos y mejorar la calidad de vida gracias a que el agua de mar se considera un recurso de amplia disponibilidad.

Sin embargo, el proceso genera un material de residuo denominado salmuera. Esta se describe como un agua altamente salina, que cuenta con componentes valiosos como el magnesio y el litio, pero que no es utilizada dentro del proceso, sino que es desechada al medio ambiente, generando impactos ambientales negativos y una importante pérdida de recursos (Arabiah & Hicks, 2025). Del Villar et al. (2023) mencionan la proporción de agua dulce y salmuera obtenida durante la desalinización en plantas, la cual es aproximadamente de 1:1, es decir, por cada litro de agua dulce generado, se produce un litro de salmuera. En cuanto a la composición, el nivel de sólidos disueltos totales del agua de mar es de 35.000 mg/L, y de la salmuera es superior a 50.000 mg/L, es decir, una concentración 43 % mayor (Arabiah & Hicks, 2025).

En el sector agrícola, su uso puede llegar a ser beneficioso y a la vez tóxico para el cultivo, por lo que es necesario regular de forma consciente el suministro. Las bajas concentraciones de calcio y magnesio, junto al exceso de cloro y sodio, y la presencia de boro, pueden resultar altamente tóxicos para numerosos cultivos (Álvarez et al., 2014).

Desde mediados del siglo XX, el método de mayor accesibilidad para la eliminación de la salmuera ha sido su descarga en aguas superficiales del mar, puesto que tiene un menor costo en comparación con otros métodos (Porada et al., 2012; Ahmed et al., 2001), este manejo genera impactos ambientales negativos a causa de las altas temperaturas del subproducto, elevada salinidad y aditivos químicos nocivos, y que varían según el método empleado (Ver **Tabla 1.3.**), lo que genera preocupación por parte de las entidades reguladoras en la implementación de políticas que reglamentan el vertido de salmuera al océano (Nielsen et al., 2024).

Tabla 1.3. Métodos de disposición de salmuera de desalinización.

Método	Limitaciones (Kumar Pramanik et al., 2017)
Descarga en aguas superficiales.	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto negativo en el ambiente marino y la vida acuática.
Inyección en pozos profundos.	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad limitada. • Podría incrementar la salinidad del agua subterránea.
Piletas de evaporación.	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren un área grande de terreno. • Contaminación del suelo y del agua subterránea. • Dependientes del clima. • Se requiere monitoreo regular.
Aplicación al suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial contaminación del suelo y del agua subterránea. • Impactos negativos en plantas y fauna silvestre. • Se requieren sistemas de distribución y almacenamiento. • Demanda limitada, por lo que no es aplicable para grandes volúmenes de salmuera. • La necesidad está influenciada por las estaciones.
Descarga al alcantarillado.	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecarga de la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales. • No es común en plantas de desalinización en agua de mar.

Pazouki et al. (2021) realizó un estudio en el que comparó diversos sistemas de desalinización, y destacó los impactos de toxicidad considerables a nivel terrestre y marino, siendo este el más afectado, con efectos como el incremento de la tasa de mortalidad de la vida marina.

Por otra parte, el impacto del agua marina en otros sectores ha sido positivo y productivo, gracias a su composición y los nutrientes que esta transporta hacia los organismos y los ecosistemas marinos, y que, gracias a esto, se producen compuestos bioactivos que han sido estudiados gracias a su potencial en la medicina. Romanach (2015) afirma que alrededor de 15.000 compuestos farmacológicamente activos han sido aislados de especies marinas, ausentes en organismos terrestres. Sus aplicaciones han evidenciado resultados en tratamientos para enfermedades como el cáncer, enfermedades inflamatorias, entre otras cuyos orígenes provienen de virus, bacterias y hongos.

Por otra parte, el aporte del agua de mar a la seguridad alimentaria ha permitido que poblaciones puedan acceder a alimentación sana, teniendo en cuenta la importancia de la nutrición en el desarrollo del ser humano y la prevención de enfermedades. La salud de una persona depende de una dieta equilibrada y rica en nutrientes, por lo que la seguridad alimentaria y la salud se relacionan directamente.

En este sentido, el mar se encarga de proporcionar no sólo alimentos ricos en proteína para millones de personas que viven en las franjas costeras, especialmente en países en vías de desarrollo, sino también alimentos saludables que contribuyen a prevenir enfermedades. Componentes como los ácidos grasos omega 3, conocidos en estos animales en forma de ácido docosahexaenoico y ácido eicosapentaenoico, son esenciales para el cuerpo humano, reduciendo así la mortalidad por enfermedad coronaria y mejorando la salud cardiovascular, regulando condiciones como la presión arterial (Romanach, 2015). Además, se encuentra un alto contenido en selenio y hierro. El selenio es un oligoelemento que juega un papel importante en el sistema inmunológico; su deficiencia en el cuerpo humano puede afectar la salud principalmente por enfermedades como el cáncer o la disfunción hormonal (Riaz et al., 2012; Moghaddam et al., 2020), además de contribuir a la respuesta del sistema ante las infecciones virales.

La obtención de estos nutrientes proviene de la calidad del agua de mar y como esta aporta para la producción de algas, plancton y microorganismos de los cuales se alimentan los peces, obtenidos a partir de los minerales contenidos dentro del agua. El agua de mar impulsa el desarrollo del ser humano y los sectores

productivos, promoviendo la seguridad alimentaria, la disponibilidad hídrica y el impulso económico que estas generan. Sin embargo, es importante generar alternativas para mitigar los impactos ambientales que generan estos procesos y que terminan afectando el potencial del recurso.

1.4. Contaminación

Se entiende la contaminación como la introducción o presencia de sustancias y organismos en ambientes o matrices y que interfiere con su salud y estabilidad, alterando su capacidad reguladora o dañando la composición del recurso (Albert, 2015). Durante las últimas décadas, el océano se ha convertido en un receptor masivo de contaminantes provenientes de actividades domésticas, industriales y agrícolas. La carga creciente de desechos ha alterado la calidad fisicoquímica y biológica del agua, favoreciendo procesos como la eutrofización, la acumulación de metales pesados y la presencia de microplásticos y compuestos orgánicos persistentes. Como resultado, los ecosistemas marinos experimentan pérdida de biodiversidad, deterioro del hábitat y cambios en la dinámica de las comunidades biológicas.

Los desechos producidos por actividades humanas llegan al agua por el vertimiento que realizan los mismos seres humanos hacia los cuerpos de aguas más cercanos. En el caso de las ciudades marino-costeras, el cuerpo receptor es el mar (Miglioranza et al., 2021).

1.4.1. Contaminación por plásticos

La acumulación de plásticos en los mares es una de las problemáticas ambientales más críticas en nuestros días. Se estima que el último destino de un aproximado de 12,7 millones de toneladas de plásticos son los océanos cada año, generando un daño irreparable en el recurso (ver **Figura 1.6**). Los residuos sólidos más conocidos incluyen empaques, bolsas, envases y fragmentos de espuma, a los que se suman elementos provenientes de actividades económicas como la pesca, cuyos residuos incluyen redes abandonadas, sogas y equipos de captura. Estos plásticos tienen estructuras complejas y componentes como plastificantes y colorantes, que modifican la cinética de la degradación (SAPEA, 2019).

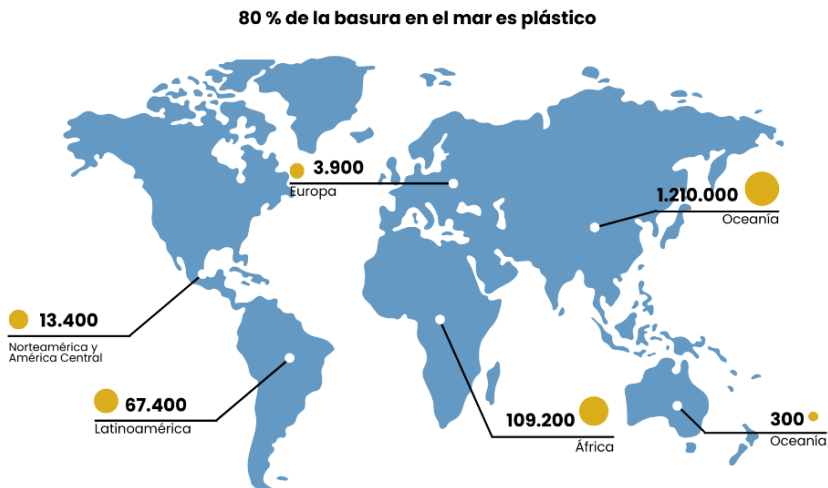


Figura 1.6. Cantidad de plásticos en el mar por continente. Fuente: Elaboración propia.

Los polímeros termoplásticos que dominan el mercado y generan la contaminación del agua marina son el polietileno de alta y baja densidad, polipropileno, policloruro vinilo, poliestireno, poliuretano y tereftalato de polietileno, los cuales representan el 90 % de la producción de plásticos (Ortega Ruiz, 2020).

Sin embargo, algunos derivados de estos materiales como lo son los textiles o cauchos también generan residuos, y aunque tengan estructuras menos complejas, también tienen procesos de degradación lentos y en condiciones no naturales (SAPEA, 2019; Lambert & Wagner, 2018). La producción anual global de estos materiales había alcanzado los 350 millones de toneladas para el año 2017, lo que lo consolidó como el tercer material más abundante hecho por el ser humano, por debajo del hormigón y el acero, utilizados mayormente en la construcción (Ortega Ruiz, 2020).

El impacto sobre la biodiversidad es significativo. Estudios realizados por Morrison et al. (2019) han examinado interacciones de 902 especies, con efectos negativos como lesiones, mortalidad, restricciones de movilidad, alteraciones alimenticias y de crecimiento, entre otras. En los humanos, el contacto de las sustancias químicas que componen estos plásticos es sumamente tóxico, y causado por la ingesta de estos elementos en los cultivos de peces (Nyquist, 2019). Esto sucede porque los fragmentos se cubren de biopelículas que los asemejan a alimentos reales.

La situación adquiere particular relevancia en países como Colombia, donde muchos asentamientos humanos se ubican en zonas costeras, haciendo que la contaminación afecte a manglares, playas y otros ecosistemas (Garcés, 2021). Este no es un fenómeno aislado, sino una consecuencia de la gestión deficiente de los residuos sólidos en el territorio, teniendo en cuenta que, en Colombia, un 82,8 % de la población tiene acceso a la disposición de residuos sólidos, de los cuales el 98,5 % se encuentra en la zona urbana y el 31,49 % en la zona rural (Ministerio de Vivienda, 2025).

1.4.2. Contaminación por componentes químicos

Contaminantes como los derrames de petróleo, los desechos agrícolas, industriales y domésticos, así como también los desechos de los barcos, generan contaminantes que destruyen muchos hábitats marinos. Los pesticidas, herbicidas y fertilizantes utilizados en los cultivos contienen elementos como nitrógeno y fósforo que, al ser arrastrados por escorrentías superficiales y sistemas fluviales, alcanzan zonas costeras y marinas. Esto favorece el desarrollo de ecosistemas nocivos que pueden cubrir extensas superficies del mar y desplazar a otras especies, y se denomina eutrofización (ver **Figura 1.7**). En los países en vías de desarrollo, entre el 80 y 90 % de las aguas residuales generales se vierten sin tratamiento adecuado en cuerpos de agua naturales (Allaoui et al., 2015). Invemar (2020) posiciona este tipo de contaminación como la mayor fuente, y la encargada de afectar la calidad del agua marina costera del país.

El vertido de estas aguas residuales con contenidos elevados de microorganismos patógenos y toxinas, cuyas concentraciones se han evidenciado elevadas en

diversos estudios realizados en países como Estados Unidos y Francia, como se describe en la **Tabla 1.4**.

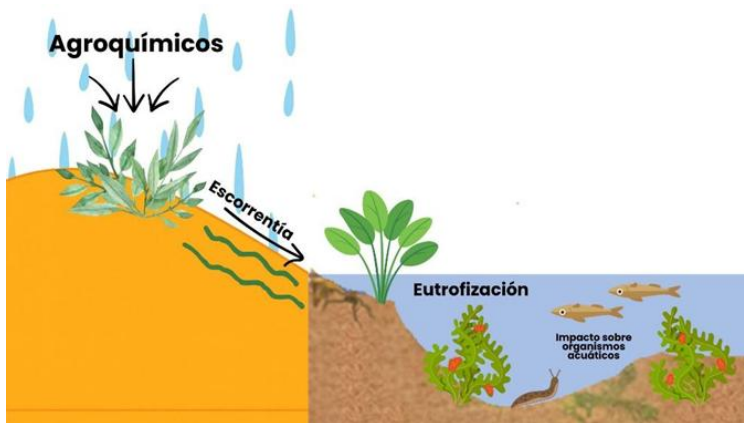


Figura 1.7. Proceso de eutrofización por agroquímicos vertidos en el agua de mar. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.4. Estudios de concentraciones de microorganismos patógenos en agua de mar.

País	Matriz	M.O.	UFC/100 ml	Fuente
USA	Agua estuarina	<i>E. coli</i>	2-1340	Saingam, et al. (2020)
		<i>Enterococos</i>	1-220	
	Sedimento estuarino	<i>E. coli</i>	$10^{1,6} - 10^{3,1} *$	
		<i>Enterococos</i>	$10^{1,6} - 10^{2,8} *$	
Agua estuarina	<i>Enterococos</i>	1337±632	Economy, et al. (2019)	
	Agua marina	<i>Enterococos</i>		2484±1693
Francia	Agua estuarina	<i>E. coli</i>	34-65	Touron, et al. (2007)
		<i>Enterococos</i>	<10-46	
India	Agua marina	<i>Salmonella</i>	$5,85 \times 10^5$	Meena, et al. (2020)
UK	Agua marina	<i>E. coli</i>	$3,20 \times 10^3$	Janahi, et al. (2020)

M.O.: Microorganismo; UFC/x: Unidades formadoras de colonia por 100 ml (* esta expresado en UFC por 100 g).

Su acción no sucede de manera aislada, pues se apoya de los microplásticos para crear biopelículas microbianas, las cuales contaminan el ambiente acuático marino y costero (Saenz Arias, et al., 2023), situación que afecta la salud de organismos marinos y altera las cadenas tróficas esenciales para las actividades asociadas a la pesca y la acuicultura. También se evidencia la reducción de la disponibilidad de oxígeno en el agua debido al aumento en la demanda de oxígeno durante su descomposición, alterando la productividad marina.

1.4.3. Contaminación por metales pesados

Los metales pesados representan una amenaza severa debido a su alta toxicidad, estabilidad y capacidad de bioacumulación. Se relacionan también con el vertimiento de aguas contaminadas, las cuales liberan mercurio, cadmio, plomo, cromo, entre otros que, incluso en concentraciones mínimas, causan daños significativos en organismos marinos (Beltrame et al., 2009; Hao et al., 2019; Lim et al., 2022).

Se han registrado altas y peligrosas cantidades en regiones como el Mar Rojo, que han afectado no sólo la actividad pesquera, sino también la salud pública (Younis et al., 2025; Zhang et al., 2024). La exposición prolongada de peces y moluscos a metales pesados puede generar deformaciones, disminución en las tasas reproductivas, estrés oxidativo y mortalidad. En humanos, el consumo de especies contaminadas puede causar daños neurológicos, renales o carcinogénicos. Sin embargo, es importante aclarar que algunos metales como el cobre, el zinc o el hierro cumplen funciones biológicas esenciales en pequeñas cantidades, pero se vuelven tóxicos cuando exceden ciertos umbrales, dificultando las estrategias de monitoreo (Younis et al., 2025).

1.4.4. Dispersión, acumulación e interacción entre contaminantes

Los contaminantes que ingresan al océano no permanecen estáticos, pues su comportamiento está determinado por las corrientes marinas, la interacción con los sedimentos, la actividad biológica y las características fisicoquímicas del agua. Es la razón por la cual muchos de estos contaminantes se transportan hacia zonas alejadas afectando ecosistemas sensibles como arrecifes de coral.

La capacidad de retención de contaminantes de estos ecosistemas también los convierte en áreas críticas, evidenciando el grado de presión al que están sometidos (Garcés et al., 2019; Rangel et al., 2020).

La interacción es otro factor preocupante dentro de los estudios de agua de mar. Los microplásticos tienen la capacidad de absorber metales pesados, pesticidas y compuestos orgánicos persistentes. De Souza Machado et al. (2016) afirma que la contaminación en estos ambientes es un problema internacional que afecta las poblaciones biológicas con consecuencias graves como extinción de especies, resistencia microbiana y alteraciones enzimáticas y genéticas.

1.5. Costos de producción

Los costos que implica la utilización del agua de mar para los sectores productivos están directamente ligados al proceso de desalinización, el cual constituye la base para su aprovechamiento en cualquier actividad económica. Según Alrabiah & Hicks (2025), el agua de mar, a diferencia de otras fuentes hídricas convencionales, requiere pasar por etapas de pretratamiento, separación y, en algunos casos, remineralización, para obtener calidad apta para consumo humano o uso industrial, lo que según Chamay Azañero (2024) involucra gastos asociados a energía, infraestructura, operación, mantenimiento, disposición de residuos, insumos químicos, así como la reposición periódica de componentes y equipos sometidos a desgaste por la alta salinidad.

El costo de producción promedio del recurso ha sido estimado en alrededor de 0,60 euros por metro cúbico, equivalente aproximadamente 0,69 dólares, COP 2.600 aproximadamente, cifra que se ha mantenido relativamente estable en el tiempo (Moreno et al., 2023). Aunque puede parecer accesible en comparación con otras fuentes alternativas, este valor limita significativamente la viabilidad económica de la desalinización para el sector agrícola, que requiere grandes volúmenes de agua a bajo costo para mantener su competitividad. En dicho sector, incluso aumentos marginales en el precio por metro cúbico pueden traducirse en incrementos considerables en los costos de producción, por lo que la adopción masiva de agua desalinizada sigue siendo un reto.

En tecnologías emergentes o sistemas que integran energías alternativas, como la solar, los costos pueden incrementar de manera notable. Sistemas de concentración solar acoplados a destilación multiefectos (MED) o configuraciones híbridas registran valores entre 2,5 y 3 USD/m³ (Al-Obaidi et al., 2022). De forma similar, algunas plantas basadas en energía fotovoltaica y osmosis inversa (PV-RO) pueden alcanzar costos de hasta 9 USD/m³ (Chamay Azañero, 2024). En consecuencia, se infiere que las variaciones en los costos dependen no solo de la tecnología utilizada para la separación salina, sino también del origen y estabilidad del suministro energético. Así, la integración de energía renovable es atractiva desde una perspectiva ambiental, pero aún enfrenta retos económicos que deben considerarse. La **Tabla 1.5.** describe las diferentes tecnologías de desalinización de agua de mar y sus costos y la **Figura 1.8.** realiza la comparación gráfica en costos mínimos y máximos.

Tabla 1.5. Costos del proceso de desalinización por tecnología.

Tecnología	Sistema	Costo (USD/m ³)	Fuente
Ósmosis Inversa (RO)	Sistemas medianos o grandes	0,26–1,62	(Shatat & Riffat, 2014)
	Operaciones convencionales	0,7–0,66	(Al-Obaidi et al., 2022)
Tecnologías térmicas	Flash Multietapa (MSF)	0,84–1,6	(Al-Obaidi et al., 2022)
	Destilación Multiefectos (MED)	1,21–1,59	(Al-Obaidi et al., 2022)
	Destilación Multiefectos Renovable	2,5–3	(Sayed et al., 2023)
Híbridas y solares	PV-RO	9	(Chamay Azañero, 2024)
	Destilación Multiefectos Solar en plantas grandes.	0,52–1,01	(Bhagwati et al., 2023)
	Destilación Multiefectos Solar en plantas pequeñas.	2–10	(Bhagwati et al., 2023)
	Destilación solar optimizada	0,548 USD/s	(Kaabinejadian et al., 2023)

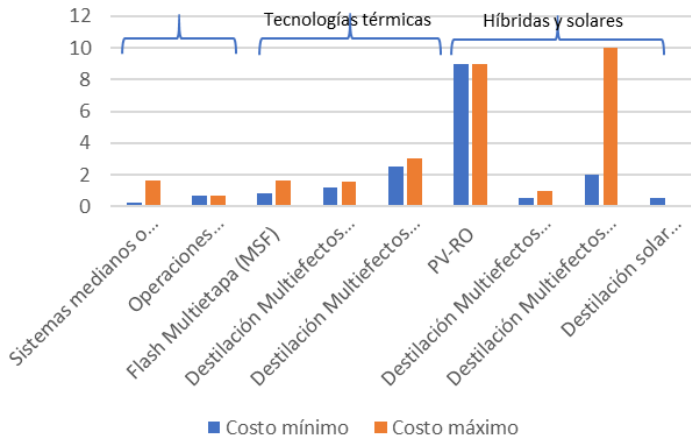


Figura 1.8. Comparativa de costos de desalinización según tecnología utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Los costos del proceso de desalinización están fuertemente influenciados por diversos factores, entre los cuales el consumo energético ocupa un papel central. La energía constituye uno de los rubros de mayor peso en el costo final por metro cúbico, dado que la separación de sales requiere vencer limitaciones termodinámicas y operativas propias del agua de mar. Se estima que el consumo energético mínimo teórico para desalinizar un metro cúbico de agua de mar es de 1,07 kWh, aunque en la práctica este valor aumenta significativamente (Feo-García et al., 2024). Tecnologías como la MSF requieren entre 13,5 y 25,5 kWh/m³, mientras que la RO oscila entre 3 y 8 kWh/m³ (Al-Obaidi, et al., 2022).

La posibilidad de integrar energías renovables, como solar o eólica, permite proyectar reducciones de costos en el largo plazo, especialmente cuando se busca disminuir la dependencia de fuentes fósiles. No obstante, esta integración implica altos costos iniciales en infraestructura, sistemas de almacenamiento, inversores, baterías u otros componentes que garanticen un suministro estable durante el día y la noche. Esto hace que la decisión de adoptar tecnologías renovables dependa tanto de las condiciones climáticas del sitio como de la disponibilidad de inversión inicial.

Otro factor determinante es la infraestructura requerida. Los costos de capital representan el componente inicial más alto del proceso, siendo determinantes para evaluar la viabilidad financiera de cualquier proyecto de desalinización. La adquisición de membranas, bombas de alta presión, calderas, sistemas de recuperación energética y módulos de pretratamiento implica inversiones considerables. Por ejemplo, una planta fotovoltaica acoplada a ósmosis inversa (PV+RO) puede requerir entre 106 y 137,5 millones de dólares únicamente en infraestructura inicial (Kaya, et al., 2019). A ello se suma el costo de construcción, adecuación del terreno, conexión a redes y sistemas de monitoreo.

La escala de la planta también influye significativamente en el costo unitario. Las plantas pequeñas presentan costos más elevados por metro cúbico debido a economías de escala limitadas: deben cubrir gastos de operación, personal y energía con volúmenes reducidos de producción. Bhagwati et al. (2023) señalan que plantas de MED alimentadas por energía solar con capacidades inferiores a 100 m³/día pueden registrar costos de hasta 10 USD/m³, mientras que instalaciones de mayor tamaño superan apenas los 0,52 USD/m³. Esta diferencia evidencia que la desalinización se vuelve más competitiva, cuando se ejecuta en sistemas de gran capacidad y con alta eficiencia energética.

Otros elementos relevantes incluyen las condiciones ambientales y la calidad del agua de alimentación. La irradiación solar, la temperatura ambiente, la salinidad del agua de mar e incluso la presencia de contaminantes o sólidos suspendidos afectan tanto los costos operativos como los de mantenimiento. Sistemas ubicados en zonas con bajas temperaturas requieren mayor energía para calentar el agua, mientras que áreas con alta salinidad aumentan el desgaste de equipos y reducen la vida útil de las membranas. Al-Obaidi et al. (2022) subrayan que factores como la proximidad al mar, la disponibilidad de terrenos y la infraestructura vial influyen también en el costo total mediante gastos adicionales de transporte, bombeo y logística.

Un componente frecuentemente subestimado es el costo asociado a la disposición de los residuos generados por el proceso de desalinización, principalmente la salmuera. Este material, al presentar una salinidad mayor a la del agua de mar, debe ser manejada de forma responsable para evitar impactos ecológicos en los

ecosistemas marinos o terrestres. Su incorrecta disposición puede afectar la biodiversidad, generar cambios en las corrientes locales e incluso alterar las características fisicoquímicas del entorno.

Los métodos de disposición tienen costos diversos, como se observa en la **Tabla 1.6**. Generalmente, la opción más económica es la descarga del subproducto en sistemas de aguas residuales, con valores entre 0,32 y 0,66 USD/m³, aunque su aplicabilidad depende de la capacidad de la infraestructura municipal. Otras alternativas como la inyección en pozos profundos pueden incrementar significativamente los costos y requieren condiciones geológicas o climáticas específicas. La elección del método debe equilibrar valores económicos, ambientales y regulatorios.

Tabla 1.6. Métodos de disposición de residuos de desalinización y sus costos.

Método	Costo (USD/m ³) (Panagopoulos et al., 2019; Ziolkowska & Reyes, 2017)
Descarga en aguas superficiales.	0,03-0,30
Inyección en pozos profundos.	0,33-2,64
Piletas de evaporación.	1,18-10,04
Aplicación al suelo.	0,74-1,95
Descarga al alcantarillado.	0,32-0,66

El proceso de desalinización ha sido adoptado por numerosos países como estrategia para mejorar la disponibilidad de agua potable, especialmente en regiones áridas o semiáridas donde los recursos hídricos convencionales son insuficientes. En estos contextos, la implementación de nuevas tecnologías, la incorporación de energías renovables y el uso de sistemas de recuperación energética han permitido reducir costos y mejorar la eficiencia, posicionando a ciertos países como referentes globales en esta materia.

En Abu Dhabi, de los Emiratos Árabes Unidos, donde se han desarrollado soluciones innovadoras para disminuir costos sin comprometer la sostenibilidad del proceso. El estudio, desarrollado por Kaya et al. (2019) señalan que la integración de ósmosis inversa con energía solar permitió alcanzar costos

nivelados de agua entre 0,28 y 0,35 USD/m³, cifras altamente competitivas en comparación con otras tecnologías térmicas como MSF o MED. Este tipo de sistemas no solo consume menos energía por metro cúbico, sino que reduce los costos operativos, y permite una mayor estabilidad en los precios del agua, convirtiéndolo en una solución ideal para regiones con alta irradiación solar.

Arabia Saudita también ha avanzado en la adopción de sistemas solares aplicados a tecnologías MED o configuraciones híbridas como PV+RO. Estas iniciativas permitieron reducir los costos de producción hasta en un 34 % en comparación con sistemas alimentados exclusivamente con fuentes no renovables (Chamay Azañero, 2024). Aunque la inversión inicial fue elevada, los beneficios a largo plazo incluyen una reducción significativa de la huella de carbono, una mayor eficiencia energética y la posibilidad de aprovechar las condiciones ambientales extremas del país para generar agua de forma sostenible.

En la región de norte de África y Medio Oriente (MENA), los costos de desalinización respaldada por energías renovables continúan siendo más altos que los métodos convencionales. Tecnologías como MED alimentadas con energía solar térmica pueden costar entre 2,5 y 3 USD/m³, mientras que sistemas RO con energía fotovoltaica alcanzan valores entre 12,5 y 16,8 USD/m³, muy por encima de los métodos tradicionales que se sitúan desde 0,5 USD/m³ (Saved et al., 2023). No obstante, estas tecnologías siguen siendo evaluadas debido a su potencial para reducir costos operativos a largo plazo y, especialmente, por su menor impacto ambiental.

1.6. Relación con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)

Con la creciente preocupación por las problemáticas sociales, económicas y ambientales que atraviesa el mundo y la necesidad del desarrollo, los miembros de las Naciones Unidas consolidaron un grupo de objetivos que permiten atender las principales problemáticas (Uzcátegui, 2016). El crecimiento exponencial de la población y la sobrecarga hídrica que genera esta situación hace que varios de estos objetivos se enfoquen en la protección del recurso y el acceso a este por parte de las comunidades más vulnerables.

Respecto al uso sostenible del agua de mar, se relacionan seis objetivos de desarrollo sostenible, en mayor o menor medida, que buscan proteger la sostenibilidad del recurso, la vida marina y mitigar el impacto ambiental. Como eje principal, el ODS 14 se centra en las problemáticas existentes en el planeta en cuanto a su riqueza oceánica, ya que esta conforma el 97 % de la superficie terrestre. A partir de este, los ODS 6, 13, 12, 9 y 7, cuyos enfoques son mayormente ambientales y sociales, presentan una articulación en la que se aprovecha el recurso para impulsar la productividad económica sin comprometer su integridad.

1.6.1. Objetivo 14: Vida submarina.

El objetivo 14 se centra en el uso sostenible y conservación de los océanos, los mares y los recursos marinos, por lo que está relacionado en mayor medida y de forma directa con el sector en estudio. El objetivo reconoce la importancia de los océanos y mares sanos para garantizar la vida en la Tierra y la existencia humana y la prioridad que tiene en la actualidad el uso sostenible de los océanos.

La contaminación marina encendió las alarmas de las autoridades, puesto que entre 5 y 12 millones de toneladas métricas de plástico llegan a estas aguas cada año (ONU, 2015). Estos materiales, además de las descargas de contaminantes por actividades industriales y las emisiones anuales de CO₂, que para los océanos significa una absorción del 23 % (ONU, 2015). Someterse a estas condiciones altera el pH medio del océano, amenazando la vida marina, la cadena alimentaria y los servicios vitales que los océanos prestan al desarrollo del ser humano. El recurso también se ve directamente afectado por los efectos del cambio climático, ya que este ha logrado que el calentamiento de las aguas marinas alcance niveles muy altos, amenazando así los ecosistemas y los arrecifes de coral de todo el mundo.

Para el año 2022, el ODS 14, aplicado a países en cuyo territorio cuentan con zona costera (**Figura 1.8.**), debía haber cumplido con 4 de las 7 metas planteadas (Andriamahefazafy, et al., 2022): 14.2, relacionada con la protección de los ecosistemas marinos; 14.4, que busca reglamentar la explotación pesquera; 14.5, cuyo interés es la conservación de al menos el 10 % de las zonas costeras y

En Europa, el informe presentado por Eurostat (2023) menciona que el progreso en las metas del ODS 14 fue menos favorable en la mayoría de los países (Ver **Tabla 1.7.**).

Tabla 1.7. Progreso en el desarrollo del ODS 14 en Europa.

Pais	Sin avance	Lento	Moderado	Rápido
Bélgica				X
Bulgaria				X
Dinamarca	X			
Alemania			X	
Estonia		X		
Irlanda			X	
España			X	
Francia			X	
Croacia				X
Italia				X
Chipre			X	
Letonia			X	
Lituania				X
Malta				X
Holanda			X	
Polonia	X			
Portugal	X			
Rumania				X
Eslovenia		X		
Finlandia		X		
Suecia	X			

1.6.2. ODS 6: Agua limpia y saneamiento

Derivado de la protección y la conservación de los mares para su aprovechamiento responsable y de la amplia disponibilidad del agua salada por encima del agua dulce, apta para consumo humano, es necesario analizar el ODS 6, en el que se representa la necesidad más básica del ser humano para el cuidado de su salud y

su bienestar. Con el incremento demográfico, el cual menciona que el planeta podría llegar a tener alrededor de 8.500 habitantes en el año 2030 (ONU, 2022), por lo que apenas un 2,5 % de agua dulce no es suficiente, teniendo en cuenta que el 70 % de esta se encuentra congelada. Esto abre una brecha en cuanto a accesibilidad a servicios básicos, creando una problemática para los gobiernos y la productividad de los sectores económicos.

Según la ONU, para el año 2022, 2200 millones de personas no contaban con un recurso potable gestionado de forma segura, y de estos, 703 millones no contaban con un servicio básico de agua. Si se tiene en cuenta las condiciones que presenta el cambio climático y como este disminuye la disponibilidad del agua, haciendo que se vea amenazada no sólo la accesibilidad al recurso, sino también el desarrollo sostenible y la biodiversidad.

La protección del agua de mar, cuya disponibilidad es de un 97 %, tiene el potencial para mitigar la problemática presentada y acercar el recurso hídrico a las comunidades que presentan menor accesibilidad, y a los sectores productivos que se encuentran en ellas.

1.6.3. ODS 13: Acción por el clima

Científicos han determinado que, en el próximo siglo, el clima global se verá alterado significativamente, como resultado del aumento en las concentraciones de gases invernadero (Houghton et al., 1990). Como efecto, se espera que la temperatura planetaria aumente entre 1,5 y 4,5 °C (Gallardo & Barra, 1997). Las afectaciones que deriva este fenómeno se extienden a la vida humana y la vida en la Tierra. La evolución del cambio climático a causa de los gases de efecto invernadero es más rápido de lo previsto, generando fenómenos meteorológicos extremos y cambiantes, sobre todo en los recursos hídricos.

En cuanto a los recursos hídricos, estos se encuentran bajo presión a partir de la problemática: el agua dulce empieza a disminuir su disponibilidad, y el agua salada experimentará subidas de nivel que pueden derivar en tragedias y catástrofes, además de inestabilidad y guerras. La disminución del recurso hídrico también puede frenar el crecimiento económico y la seguridad alimentaria al disminuir la

productividad agrícola. Se han detectado daños económicos a causa del cambio climático en sectores como la agricultura, la silvicultura, la pesca, la energía y el turismo (IPCC, 2023).

Por esto, la gestión hídrica debe ir de la mano con el cambio climático, generando estrategias que permitan la protección y aprovechamiento del recurso y la mitigación de los efectos que el cambio climático trae al planeta (UNESCO & ONU-Agua, 2020), lo que relaciona este ODS y sus metas con el aprovechamiento del agua de mar como un recurso de productividad.

1.6.4. ODS 12: Producción y consumo responsables

El incremento poblacional implica un cambio en los patrones actuales de producción y consumo, lo que ha ejercido una presión sobre los ecosistemas y un agotamiento acelerado de los recursos, generación de residuos y degradación ambiental. El reto que tiene el planeta es transformar las prácticas económicas tradicionales hacia modelos más eficaces y sostenibles (Uzcátegui, 2016; Gil, 2018).

En este contexto, la economía circular ha cobrado relevancia ya que permite un nuevo modelo en el que es posible mitigar el impacto generado por la sobreexplotación de recursos y del consumo. Este permite disminuir el impacto ambiental mediante la reutilización de materiales, el reciclaje de sus productos y el uso responsable de materias primas vírgenes. Recursos como la salmuera, cuya valorización se encuentra en los minerales que la componen, sea un ejemplo de cómo la economía circular puede mejorar la calidad de vida y mitigar los impactos.

Además, su relación con el agua de mar incluye también la disminución de la contaminación, búsqueda de alternativas frente a la explotación de fuentes de agua dulce y la necesidad de garantizar estabilidad hídrica. La gestión inadecuada de los residuos y del recurso, representa un riesgo significativo para los ecosistemas costeros y marinos, por lo que su tratamiento y disposición requieren la adopción de criterios estrictos de eficiencia, constituyendo el núcleo del objetivo (Naciones Unidas, 2021).

1.6.5. ODS 7: Energía asequible y no contaminante

Se estima que, para el año 2030, alrededor de 660 millones de personas continuarán sin el acceso a energía eléctrica, y casi 2.000 millones de personas dependerán de energías contaminantes y combustibles para cocinar (ONU, 2015). Junto con el acceso al agua potable, esta situación hace notoria la desigualdad social en la que se vive en la actualidad. Por otra parte, la ONU (2015) el consumo de energía, si bien es necesario, es el principal causante del cambio climático ya que es el responsable de alrededor del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto pone sobre la mesa una preocupación por la cual se origina este objetivo, que busca garantizar el acceso universal a electricidad asequible en 2030, y que estas fuentes sean de energía limpia, proveniente de recursos naturales como la luz solar o el viento.

Sin embargo, se ha evidenciado una capacidad energética relacionada con el uso de agua de mar tanto para su producción como para su aprovechamiento. En cuanto a su producción, la combinación de la energía solar y eólica permiten el movimiento del agua, el cual ha evidenciado ser generador de energía eléctrica. Por otra parte, se evidencia una gran dependencia energética, puesto que se requiere de energía para que las plantas desalinizadoras puedan acercar el recurso hídrico a sectores productivos. Es esta dependencia energética la que ha generado preocupación por el impacto ambiental asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que gran parte de la energía utilizada en instalaciones convencionales aún proviene de fuentes fósiles (UNESCO & ONU-Agua, 2020).

La relación entre este objetivo y el uso de agua de mar se evidencia en dos extremos, el primero, avanzar hacia un suministro energético, limpio y asequible, pero también depender del acceso a energía para acercar el recurso hídrico a las comunidades. Es por esta razón que la transición hacia energías renovables constituye un pilar estratégico para el aprovechamiento sostenible del agua de mar.

1.6.6. ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

El uso de agua de mar para fines productivos se encuentra estrechamente vinculado con el desarrollo tecnológico y la infraestructura industrial, elementos

centrales del ODS 9. La desalinización, la generación de agua para procesos industriales y la valorización de subproductos como la salmuera dependen de soluciones de ingeniería de alta complejidad que requieren de innovación continua (Arabiah & Hicks, 2025). En las últimas décadas, los avances en materiales, membranas de RO, sistemas de bombeo y estructuras anticorrosivas han permitido mejorar la eficiencia, reducir costos y expandir la capacidad operativa de las plantas (Gálvez & Cisternas, 2017).

Como se mencionaba en apartados anteriores, el procesamiento del agua marina implica inversiones elevadas y la integración de sistemas robustos e inteligentes ante fenómenos climáticos. Rozenberg & Fay (2019) señalan que la provisión de infraestructura de agua y saneamiento adecuada es esencial para garantizar servicios básicos universales, mejorar el bienestar social y cerrar brechas de desarrollo. La infraestructura hídrica debe ser sostenible si se busca el desarrollo económico. Así, el fortalecimiento de la infraestructura permite la gestión del recurso, pero también la innovación para transformar el agua de mar en una oportunidad estratégica para el desarrollo sostenible y la diversificación industrial.

1.7. Conclusiones

El agua de mar representa un recurso de gran valor estratégico y económico, dado su abundancia y las propiedades físicas y químicas que la caracterizan. Sin embargo, su utilización, especialmente en procesos de desalinización, genera desafíos ambientales significativos, como la producción de salmuera. La incorporación de tecnologías sostenibles y la regulación consciente del aprovechamiento de minerales disueltos, junto con una gestión hídrica que considere los efectos del cambio climático, son fundamentales para garantizar un uso responsable y eficiente de este recurso.

La transición hacia energías renovables para alimentar los procesos y la adopción de prácticas de economía circular podrían fortalecer la sostenibilidad del aprovechamiento del agua de mar, permitiendo su contribución en la satisfacción de las necesidades humanas sin comprometer la salud de los ecosistemas oceánicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Mindtech s.a.s., la Universidad del Valle, la Universidad de Córdoba, Polymeiker s.a.s., MT-Solsosting s.a.s., Instituto de Ciencia y Tecnología Analítica Golden-Hammer s.a.s. por los fondos suministrados en el marco del proyecto MT-012025 (C.I. 71408 Univalle) - Convenio MT-AFICAT-202501. Asimismo, agradecen al Departamento Nacional de Planeación de Colombia a través del Sistema General de Regalías por los recursos suministrados en el marco del proyecto BPIN 2020000100261.

Referencias

- Al-Obaidi, M. A., Zubo, R. H., Rashid, F. L., Dakkama, H. J., Abd-Alhameed, R., & Mujtaba, I. M. (2022). Evaluation of solar energy powered seawater desalination processes: a review. *Energies*, 15(18), 6562.
- Albert, L.A. (2015). Capítulo 4. Contaminación Ambiental: Origen, clases, fuentes y efectos. En: L. A. Albert & M. Jacott (Eds), *México tóxico: emergencias químicas*. Siglo XXI Editores. México, D.F. 310 pp
- Álvarez, V. M., & Górriz, B. M. (2014). *Antecedentes y problemática de la aplicación de agua marina desalinizada al riego agrícola* [Informe técnico]. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Andriamahefazafy, M., Touron-Gardic, G., March, A., Hosch, G., Palomares, M. L. D., & Failler, P. (2022). Sustainable Development Goal 14: To what degree have we achieved the 2020 targets for our oceans? *Ocean & Coastal Management*, 227, 106273. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106273
- Benedí, J., & Romero, C. (2006). Descongestivos nasales. *Farmacia Profesional*, 20(9), 60.
- Bhagwati, A., Shah, M., & Prajapati, M. (2023). Emerging technologies to sustainability: A comprehensive study on solar desalination for sustainable development. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 100007.

Chamay Azañero, M. C. **(2024)**. *Proyecto de prefactibilidad para producir y vender agua envasada a partir de la desalinización del agua de mar mediante un proceso de destilación solar*. [Tesis de grado, Universidad ESAN]. Repositorio Institucional Universidad ESAN.

Cipolletta, G., Lancioni, N., Akyol, Ç., Eusebi, A. L., & Fatone, F. **(2021)**. Brine treatment technologies towards minimum/zero liquid discharge and resource recovery: State of the art and techno-economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 300, 113681. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113681

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. **(2022)**. *Una década de acción para un cambio de época: Quinto informe sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe*. CEPAL.

D'Anna, L., & Wade, E. **(2025)**. Riding the wave of acceptance: Understanding factors in support for marine energy in the United States. *Energy Research & Social Science*, 129, 104381. DOI: 10.1016/j.erss.2025.104381

Del Villar, A., Melgarejo, J., García-López, M., Fernández-Aracil, P., & Montano, B. **(2023)**. The economic value of the extracted elements from brine concentrates of Spanish desalination plants. *Desalination*, 560, 116678. DOI: 10.1016/j.desal.2023.116678

Díez, L. A. G. **(1997)**. Los recursos geológicos y energéticos del mar. *Cuadernos de Estrategia*, (88), 89–111.

Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., & Sodiq, A. **(2020)**. The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*, 495, 114633. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114633

Eurostat. **(2023)**. *Desarrollo sostenible en la Unión Europea: Seguimiento de los avances hacia los ODS en un contexto de la UE*. Comisión Europea.

- Feo-García, J., Pulido-Alonso, A., Florido-Betancor, A., & Florido-Suárez, N. R. (2024). Cost studies of reverse osmosis desalination plants in the range of 23,000–33,000 m³/day. *Water*, 16(6), 910. DOI: 10.3390/w16060910
- Gálvez, E. D., & Cisternas, L. A. (2017). *Innovative solutions for seawater use in mining operations*. Case Study of Innovative Projects – Successful Real Cases. DOI: 10.5772/intechopen.68191
- García Urrego, T. (2024). El agua salada puede ser un arma de doble filo para la producción de los alimentos. *Agronegocios.co*.
- González Laxe, F., Martín Palmero, F., & Martín Bermúdez, F. (2024). La Unión Europea y la economía azul. *Boletín Económico de ICE, (Serie histórica)*, 3166. DOI: 10.32796/bice.2024.3166.7717
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report: Summary for policymakers*.
- Javeed, H. M. R., Wang, X., Ali, M., Nawaz, F., Qamar, R., Rehman, A. U., ... & Ismail, I. A. (2021). Potential utilization of diluted seawater for the cultivation of some summer vegetable crops. *Agronomy*, 11(9), 1826. DOI: 10.3390/agronomy11091826
- Kaya, A., Tok, M. E., & Koc, M. (2019). A levelized cost analysis for solar-energy-powered sea water desalination in the Emirate of Abu Dhabi. *Sustainability*, 11(6), 1691. DOI: 10.3390/su11061691
- Khan, M. Z. A., Khan, H. A., & Aziz, M. (2022). Harvesting energy from ocean: Technologies and perspectives. *Energies*, 15(9), 3456. DOI: 10.3390/en15093456
- Kluth Campos, R. M. (2024). *Formulación, elaboración y control de calidad de un suero oral a base de agua de mar*. [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

- Kumar, R., Sharma, A., Kumar, P., KS, K., Albert, H. M., Agrawal, A. P., ... & Kumar, A. (2025). Advanced materials and system innovations for seawater electrolysis in hybrid renewable energy systems: Toward sustainable hydrogen production. *Chemical Physics Impact*, 11, 100972. DOI: 10.1016/j.chphi.2025.100972
- Liu, L., Ge, M., Zheng, X., Tao, Z., Zhou, S., & Wang, G. (2016). Investigation of *Vibrio alginolyticus*, *V. harveyi*, and *V. parahaemolyticus* in large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* (Richardson) reared in Xiangshan Bay, China. *Aquaculture Reports*, 3, 220–224. DOI: 10.1016/j.aqrep.2016.04.004
- Marín Romero, D. (2013). *Efecto de la variabilidad estacional en los parámetros fisicoquímicos del agua de mar y sus repercusiones sobre sistemas de protección catódica*. [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana].
- Maris, L. (2025). *Economía azul para la salud de los océanos y el desarrollo sostenible*.
- Martínez Betrán, J., & Koo-Oshima, S. (Eds.). (2006). Water desalination for agricultural applications. Land and Water Discussion Paper No. 5. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO].
- Mavukkandy, M. O., Chabib, C. M., Mustafa, I., Al Ghaferi, A., & AlMarzooqi, F. (2019). Brine management in desalination industry: From waste to resources generation. *Desalination*, 472, 114187. DOI: 10.1016/j.desal.2019.114187
- Mayhew, N. (2018). El futuro del uranio como fuente de energía sostenible. *Boletín del Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA]*, 59(2), 24-25.
- Melgarejo Moreno, J., López Ortiz, M. I., Fernández Aracil, P. (2023). Seguridad hídrica. Alacant: Universitat d'Alacant, 1162 p.
- Miglioranza, K. S. B., Becherucci, M. E., de Marco, S. G., Pérsico, M. M., Bazterrica, M. C., Gavio, M. A., ... & Seco Pon, J. P. (2021). *Informe de revisión: Área: disponibilidad y contaminación del agua, suelos y aire: Contaminación de costas*. Red de Estudios Ambientales Bonaerense, Mar del Plata, 145 pp.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. **(2025)**. *Informe de gestión al Congreso 2024-2025*.

Morfín, M. T. **(2021)**. La vida del planeta. *Acta Pesquera*, 7(14), 17–28.

Morrison, E., Shipman, A., Shrestha, S., Squier, E., & Stack Whitney, K. **(2019)**. Evaluating the Ocean Cleanup, a marine debris removal project in the North Pacific Gyre, using SWOT analysis. *Case Studies in the Environment*, 3(1), 1–6. DOI: 10.1525/cse.2018.001875

Naciones Unidas. **(2022)**. *La población mundial llegará a 8000 millones en 2022*.

Nielsen, K., Schlenk, D., Esbaugh, A., & Mondon, J. **(2024)**. Potential environmental impacts of coastal desalination intake structures: Urgent Data Gaps and Policy Needs. *Environmental Science & Technology Letters*, 11(5), 384–393. DOI: 10.1021/acs.estlett.4c00228

Nyquist, S. **(2019)**. *What to do about plastics: An interview with Rachel Meidl*. McKinsey & Company (Sustainability Blog).

Olufisayo, O. E., & Olanrewaju, O. **(2024)**. A Review of Renewable Energy Powered Seawater Desalination Treatment Process for Zero Waste. *Water*, 16(19), 2804. DOI: 10.3390/w16192804

Ortega Ruiz, P. **(2020)**. *Detección de microplásticos en el agua de mar con espectroscopía Raman*. [Trabajo de grado, Universidad de Cantabria].

Pazouki, P., Lu, H. R., El Hanandeh, A., Biswas, W., Bertone, E., Helfer, F., & Stewart, R. A. **(2021)**. Comparative environmental life cycle assessment of alternative osmotic and mixing dilution desalination system configurations. *Desalination*, 504, 114963. DOI: 10.1016/j.desal.2021.114963

- Porada, S., Sales, B. B., Hamelers, H. V., & Biesheuvel, P. M. (2012). Water desalination with wires. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(12), 1613–1618. DOI: 10.1021/Jz3005514
- Postel, S. (1999). Pillar of sand: Can the irrigation miracle last? WW Norton & Company. 313 p.
- Pramanik, B. K., Shu, L., & Jegatheesan, V. (2017). A review of the management and treatment of brine solutions. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(4), 625–658. DOI: 10.1039/C6EW00339G
- Rojas-Díaz, P. J., & Gil-Marín, M. J. (2022). Economía azul para un mundo de negocios sostenibles. Una revisión de literatura científica. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 7(14), 69–80. DOI: 10.35381/r.k.v7i14.1863
- Romanach, J. L. (2015). Ecosistemas marinos y salud humana: Riesgos y beneficios procedentes del mar. *Mediterráneo Económico*, 27, 179–197.
- Rozenberg, J., & Fay, M. (2019). Beyond the Gap: How countries can afford the infrastructure they need while protecting the planet. Sustainable Infrastructure, World Bank Publications. DOI:10.1596/978-1-4648-1363-4
- Sanabria Brassart, J., Armengot Carceller, M., Jiménez del Valle, A., Bermejo Rodríguez, R. (2020). Encuesta poblacional a usuarios de lavados nasales con agua de mar: seguimiento de la recomendación médica, hábitos de uso, percepción de beneficios y satisfacción global. *Acta Pediátrica Española*, 78(3-4).
- Sayed, E. T., Olabi, A. G., Elsaid, K., Al Radi, M., Alqadi, R., & Ali Abdelkareem, M. (2023). Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East and North Africa MENA region. *Journal of Advanced Research*, 48, 125–156. DOI: 10.1016/j.jare.2022.08.016

Science Advice for Policy by European Academies [SAPEA]. **(2019)**. *A scientific perspective on microplastics in nature and society.* Evidence Review Report No. 4. DOI: 10.26356/microplastics

Štanfel, D., Kalogjera, L., Ryazantsev, S. V., Hlača, K., Radtsig, E. Y., Teimuraz, R., & Hrabač, P. **(2022)**. The Role of Seawater and Saline Solutions in Treatment of Upper Respiratory Conditions. *Marine drugs*, 20(5), 330. DOI:10.3390/md20050330

Stevens, R. H. **(1913)**. Isotonic sea water in therapeutics. *Buffalo Medical Journal*, 68(7), 375–380.

UNESCO & ONU-Agua. **(2020)**. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y cambio climático*. UNESCO.

Voutchkov, N., Kaiser, G., Stover, R., Lienhart, J., & Awerbuch, L. **(2019)**. Sustainable management of desalination plant concentrate - Desalination industry position paper - Energy and environment committee of the International Desalination Association (IDA) [White paper]. International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse, Dubai, United Arab Emirates.

Wagner, M., & Lambert, S. (Eds.). **(2018)**. *Freshwater microplastics: Emerging environmental contaminants?* The Handbook of Environmental Chemistry, 58. Springer Nature. DOI: 10.1007/978-3-319-61615-5

Xian, P., Ji, B., Bian, S., Zong, J., & Zhang, T. **(2023)**. Influence of Differences in the Density of Seawater on the Measurement of the Underwater Gravity Gradient. *Sensors*, 23(2), 714. DOI: 10.3390/s23020714

Zhang, X., Hua, J., Song, Z., & Li, K. **(2024)**. A review: Marine aquaculture impacts marine microbial communities. *AIMS microbiology*, 10(2), 239–254. DOI: 10.3934/microbiol.2024012

Capítulo 2

Tecnologías para el tratamiento de agua de mar

Manuel D. Palencia-Bolaños
Rafael Bolaño-Vásquez
Camila Pulido Rodríguez

2.1. Introducción

El contar con disponibilidad hídrica no garantiza su calidad para el consumo humano o los parámetros necesarios para aplicaciones de uso agrícola, acuícola, producción ganadera o industrial. El agua salada total de la tierra es de alrededor del 97% y el 0.014% es agua dulce. Con el aumento de los efectos antropogénicos del crecimiento poblacional, el consumismo desmedido y a la industrialización en las últimas décadas se ha ejercido una fuerte presión sobre el agua dulce, pronosticándose que la demanda de esta aumente entre un 20 a 30% en las próximas décadas. Con esto, las regiones menos avanzadas y descuidadas por entes gubernamentales son las más afectadas debido a la escasa o nula disponibilidad de una red de saneamiento o de fuentes naturales de agua potable. Prevalciendo la importancia de la adopción de tecnologías integrales y eficientes para la desalinización del agua de mar, produciendo agua dulce que ayude a mitigar las problemáticas alrededor de esta (Nallakukkala & Bhajan, 2021). Dentro de la oferta tecnológica para el tratamiento de agua de mar se enlistan una gran variedad de métodos, que, a su vez, tienen diferentes procesos de tratamiento para el proceso de desalinización, resumiéndose en el uso de energía térmica, mecánica, eléctrica y química, evolucionando significativamente en los últimos años. Según estudios para el 2024 la capacidad total de producción de aguas dulce -A partir de

agua de mar – superó los 95 millones de metros cúbicos (m³) por día, donde más del 80% de las plantas utilizan el método de Ósmosis Inversa. Aunque el avance y desarrollo de tecnologías para el tratamiento de agua de mar ha avanzado significativamente, enfrenta grandes desafíos que limitan su uso, generan un impacto negativo al medio ambiente y su eficiencia productiva es muy baja. Uno de los más mencionados en la literatura y que representa un riesgo latente, es el manejo de los residuos, específicamente la sal -También conocida como Salmuera-resultante del proceso de desalinización. Las plantas descargan alrededor de 150 millones de m³ de salmuera por día al océano, afectando la vida marina (Bhatt et al., 2025). En vistas de la problemática anterior, entes mundiales sugirieron acciones de control sobre la descarga desmedida de la salmuera, sin embargo, no recibió la suficiente atención como para expandir los cuidados que se deben adoptar para la descarga de esta, lo que postergó su implementación en diferentes regiones del mundo. La disponibilidad de la sal es alta, ya que es el sexto recurso natural más producido, destinando su uso en la preparación de alimentos, al igual que su implementación en las carreteras como disolvente de nieve y el hielo, una gran parte de esta se utiliza para la transformación química de alta pureza en la industria química, produciendo cloro o clorato, siendo requerido en muchos de estos procesos de transformación un nivel de pureza superior al 99.9% (Bargeman et al., 2026).

Con el fin de conocer a profundidad los métodos existentes para el proceso de desalinización del agua de mar, este estudio tiene como objetivo caracterizar las tecnologías desarrolladas para este fin, describiendo su cadena de producción, los desafíos, limitaciones y ventajas, los costos de producción, entre otros.

2.2. Tecnologías para el tratamiento de agua de mar

Entre los efectos generados por el cambio climático se encuentra las alteraciones en los ciclos hidrológicos, aumentando las sequías, la frecuencia y su severidad; Disminuyendo la presencia de agua dulce en regiones áridas, semiáridas y costera. En esta última, se estima que aproximadamente el 40% de la población mundial habita en las zonas costeras, las cuales, en su gran mayoría, carecen de fuentes de agua dulce para consumo humano. Con el incremento del estrés hídrico y la limitación presente en el uso del agua disponible, se resalta la urgente necesidad

en la producción, investigación y adopción de alternativas sostenibles para suplir la creciente demanda de agua dulce (Al-Hamzawi & Al Sailawi, 2025; Balaji et al., 2021; Shamet & Antar, 2023).

La industria de la desalinización ha crecido exponencialmente en los últimos quince años, por los avances en el desarrollo y optimización de las tecnologías utilizadas, la disminución de los costes específicos del agua desalinizada y el incremento de la capacidad instalada (Saldivia et al., 2019). La producción mundial de agua desalinizada es de alrededor de 38.000 millones de m³. Donde el 61% del agua empleada para esto proviene del agua de mar y no de otras fuentes salinas, lo que muestra la dependencia hacia las fuentes oceánicas para mitigar la creciente necesidad de agua dulce (Haqiqi et al., 2025). La implementación de estas tecnologías y su expansión a nivel mundial, el vertimiento de salmuera resultante del proceso de desalinización se ha convertido en un problema medioambiental grave y con rápido crecimiento. Se pronostica que a nivel mundial hay más de 16.000 plantas desalinizadoras, distribuidas en 177 países, éstas producen aproximadamente 95 millones de m³ de agua dulce al día, de la cual la salmuera representa entre un 1,5 y 2 veces la cantidad de agua producida; descargada generalmente en el océano o cuerpos de agua cercanos (Suu et al., 2026).

Las tecnologías para el tratamiento de agua de mar se clasifican según su proceso, estas pueden estar basadas en membranas, térmico y cristalización. Estos a su vez, se clasifican según su implementación comercial, en el uso de membranas destaca la ósmosis inversa y la electrodiálisis, en los procesos térmicos destaca el flash multietapa, la destilación multiefecto y la destilación por compresión de vapor (Balaji et al., 2021; Shamet & Antar, 2023). Con los recientes avances tecnológicos se han desarrollado procesos de desalinización, como la congelación, la desionización capacitiva y los procesos de humidificación-deshumidificación, a pesar de los resultados favorables obtenidos, la adopción y expansión comercial de estos procesos es limitado (Romo, Storch & Srebric, 2024). Lo anterior, viéndose influenciado por las condiciones geográficas y económicas específicas de cada país o región, el tamaño de la planta desalinizadora y las fuentes de energía disponibles; Lo que varía el capital necesario, los costes operativos y el rendimiento técnico (Haqiqi et al., 2025). Sin embargo, los procesos de desalinización con mayor apropiación y despliegue comercial son aquellos basados en destilación

multiefecto y ósmosis inversa, debido al menor consumo energético, la alta capacidad de producción y la madurez tecnológica (Romo, Storch & Srebric, 2024).

2.2.1. Sistemas de desalinización térmicos

Estos sistemas de desalinización utilizan la energía térmica para crear un cambio de fase pasando de líquido a vapor y así separar el agua de las sales disueltas. Las plantas desalinización térmica se ubican generalmente cerca a instalaciones de plantas eléctricas; Esto en aplicaciones industriales. En caso contrario, en aplicaciones de baja escala se utilizan motores diésel o compresores mecánicos los cuales se encargan de generar la energía térmica (Huang et al., 2024). Este tipo de tecnología aporta el 28% de la capacidad mundial de desalinización de agua de mar y está distribuida a nivel mundial como se muestra a continuación (Cancilla et al., 2024).

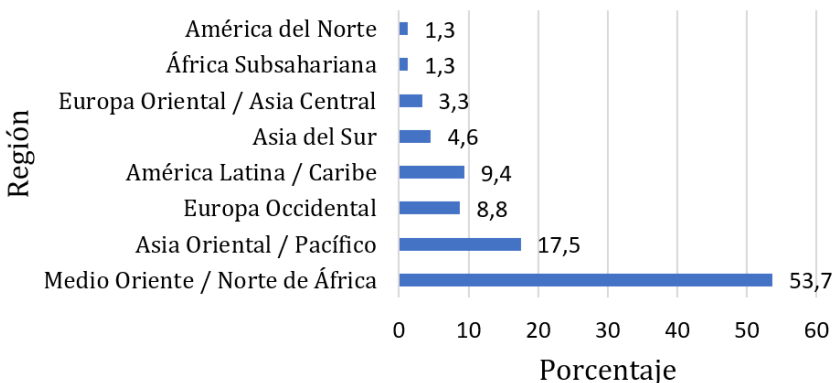


Figura 2.1. Distribución geográfica mundial de las plantas de desalinización térmica. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Cancilla et al. 2024).

2.2.1.1. Destilación multiefecto (MED): Desde los años 90s, el proceso de destilación multiefecto ha sido la técnica de desalinización más utilizada en el ámbito industrial, debido a su alto nivel de fiabilidad y resistencia a problemas vinculados a la acumulación de salmuera dentro de los distintos sistemas que

componente esta técnica (Dashputre et al., 2023). Esta tecnología de desalinización utiliza múltiples etapas de evaporación y condensación para convertir el agua de mar en agua apta para el consumo humano; en gran parte. El sistema utiliza con eficiencia la energía térmica, reutilizando el calor generado para desalinizar más agua salada en procesos subsiguientes a este, gracias a esto su uso es versátil y escalable; en la actualidad se utiliza en plantas a gran escala de desalinización. Sin embargo, requiere de una inversión inicial considerable, además de necesitar una gestión térmica para que el sistema tenga un rendimiento óptimo. El sistema está compuesto por dos secciones o partes, en uno se realiza el proceso de evaporación y el otro es la condensación, cada una de estas opera a una presión diferente. Si se explica más a detalle en la primera sección, se ingresa la solución (Agua de mar) y esta se calienta hasta que la solución hierve, el vapor pasa por un sistema de tubos hasta la segunda parte, ahí se condensa y el calor se disipa, el aire y otros gases resultantes del proceso de condensación son eliminados del recipiente, al igual que el concentrado resultante (Ver **Figura 2.2.**) (Brogioli, D. Et al. 2018).

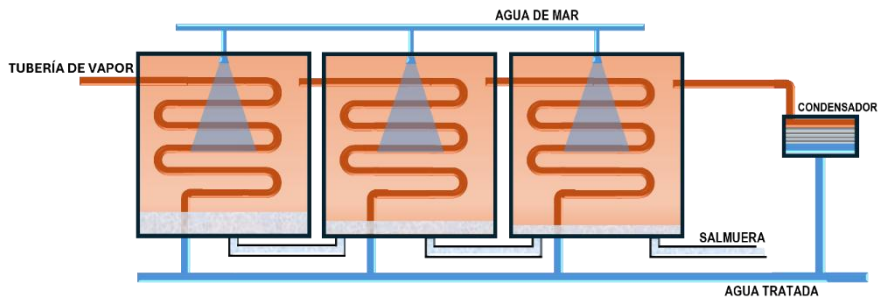


Figura 2.2. Sistema de destilación multiefecto. Fuente: Elaboración propia.

Las plantas de tratamiento MED tienen una vida operativa más larga debido a su robusto proceso térmico, que puede utilizar agua con altas concentraciones de sal y no utiliza configuraciones con membranas poliméricas que puedan incurrir en un desgaste durante el proceso de tratamiento. Sin embargo, este sistema a pesar de presentar grandes ventajas se enfrenta a múltiples desafíos, como las incrustaciones y ensuciamiento, disminuyendo la transferencia de calor;

requiriendo mantenimiento y limpieza frecuente de los tanques de condensación, al igual que preocupaciones ambientales relacionadas con la eliminación de salmueras (Haqiqi et al., 2025; Al-Hamzawi & Al Sailawi, 2025).

En cuanto a la configuración y fabricación de los modelos MED publicados, muestran los parámetros de operación que cubren tasas de producción de destilados grandes y medianos de 133 kg/s y 57–61 kg/s, respectivamente. Asimismo, se muestra la temperatura para el precalentamiento, sin embargo, este mismo parámetro no se encuentra real de los procesos de desalinización. De manera muy similar, sucede con otras partes de este como el área del condensador, pues los datos son exclusivos del fabricante, haciendo que las mediciones en el sitio varíen, recurriendo al desmonte de los equipos, el acceso a componentes y conocimientos especializados, presentando incógnitas que rodean los datos de las configuraciones y un vacío en los datos de plantas de desalinización reales (Romo, Storch & Srebric, 2024). Para este mismo sistema de desalinización tiene tres configuraciones utilizadas con mayor relevancia: Alimentación inversa, alimentación directa y alimentación cruzada paralela. Estos al igual que otros métodos convencionales de eliminación de sales, demandan una cantidad bastante alta de energía (Entre 24 y 79Kj mol⁻¹), la cual, por lo general es de fuentes no renovables. Alcanzando en costes aproximado al 66% del coste total de tratamiento (Tarif et al., 2025).

Sin duda alguna el consumo energético es uno de los puntos críticos de la adopción de este sistema de tratamiento. Intensificando el estudio de alternativas viables que mitiguen este problema y que aumenten la eficiencia, y la rentabilidad del tratamiento de agua de mar. Algunas de estas alternativas son la adopción de configuraciones que integren energías renovables y recuperación de calor residual, minimizando los costes y también el impacto ambiental, y las emisiones de efecto invernadero (Liponi, Wieland & Baccioli, 2020; Haqiqi et al., 2025). Por otra parte, la optimización termodinámica de los sistemas MED todavía es poco abordada de manera holística, pues se centran en el análisis independiente y poco exhaustivo del rendimiento termodinámico, la eficiencia de la exergogía y la viabilidad económica; limitando la aplicabilidad práctica y la escalabilidad de estos sistemas, especialmente en regiones donde la energía solar es abundante pero poco utilizada (Al-Hamzawi & Al Sailawi, 2025).

2.2.1.2. Flash multietapa (MSF): Las plantas MSF es el primer proceso comercial de desalinización de agua de mar utilizado industrialmente, ya que este se ha sido introducido desde la década de 1970, teniendo hoy en día una cuota de mercado bastante amplia; con más relevancia en medio oriente. Siendo una de las tecnologías para el tratamiento de agua de mar más antigua y consolidadas (Chung et al., 2016; Tareemi & Sharshir, 2023). Este sistema emplea un proceso térmico que utiliza la energía en forma de calor para evaporar el agua de mar, este vapor se condensa en las superficies de los tubos de refrigeración y así pasa por varias etapas, que alternan entre varios cambios de presión y calor. Al terminar este proceso se ubica un condensador final que acopla un sistema de expulsión de dos etapas y el eyector produce una succión de gases no condensables. Aproximadamente de 19 a 28 etapas, produciendo alrededor de 10.000 a 40.000 m³ de agua por día (Dependiendo del número de etapas que tenga la planta). El agua resultante del proceso térmico puede mantener una salinidad inferior a 10 ppm porque el vapor de la salmuera de agua de mar es puro, como se muestra a continuación (Tarif et al., 2025; Chung et al., 2016).

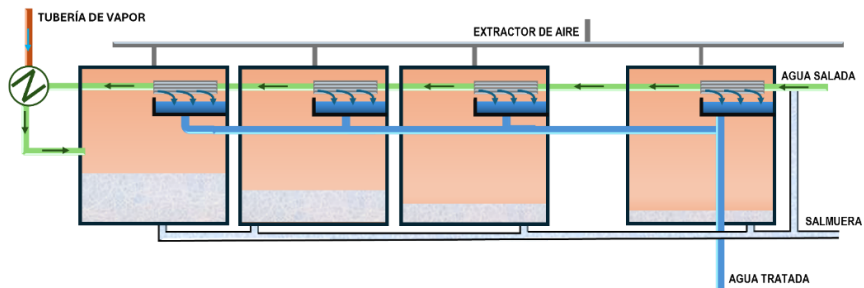


Figura 2.3. Sistema flash multietapa. Fuente: Elaboración propia.

Tiene una alta fiabilidad, escalabilidad y rentabilidad, lo cual lo convierte en una solución para aquellas regiones con poca disponibilidad de agua dulce y demandas de producción fluctuantes, siendo ampliamente utilizado en estas regiones. Gracias a su diseño modular se puede adaptar a diferentes escenarios de manera sencilla, atendiendo de manera acertada necesidades operacionales, como lo son los mantenimientos mínimos del sistema. Lo cual reafirma su relevancia para entornos desafiantes. Al igual que el anterior método, este tiene un alto consumo de energía

que supera los 144 kWh/m³ y un costo de producción de 0,96 USD/m³ convirtiéndola la tecnología de desalinización más costosa. Para mitigar esto, se han desarrollado soluciones que integran fuentes de energías híbridas, combinando el uso de paneles solares y otras energías alternativas para la minimización de costes dentro del proceso de desalinización y operativos de esta (Yasmine et al., 2025⁷). Como el sistema MSF utiliza de manera secuencial múltiples etapas para el proceso de evaporación, al compararse con el sistema MED, el sistema MSF es más económico (Comparando los costes operativos y el consumo energético) (Chung et al., 2016). Este sistema dentro de sus ventajas resalta la tasa de recuperación ya que minimiza el desperdicio de agua y maximiza la producción de agua dulce; Con una tasa de recuperación entre 30 a 80%, variando según el diseño y configuración de la planta.

Por otra parte, enfrenta situaciones desventajosas como la presencia de químicos de clasificación orgánico e inorgánico, al igual que contaminantes biológicos, estos químicos o compuestos, están presente en el agua de mar por las fuentes naturales de materia vegetal y animal en descomposición, así como por las actividades antropogénicas del ser humano, vertidos industriales y escorrentía agrícola (pesticidas, herbicidas, productos farmacéuticos, disolventes industriales e hidrocarburos disueltos, entre otros.). Lo anterior genera un incremento en las incrustaciones y corrosión dentro del sistema de tratamiento, obstruyendo las superficies de transferencia de calor, membranas y otros componentes directamente relacionados con el rendimiento operativo y el incremento de los costos de mantenimiento y limpieza. Siendo necesario el pretratamiento del agua captada del mar con técnicas de filtración, cloración o dosificación química para minimizar los contaminantes (Tareemi & Sharshir, 2023).

La implementación de esta tecnología en las comunidades se realiza con forme a la demanda de agua dulce, dictaminando así el tamaño de la planta (Pequeña, mediana y gran escala) y los recursos en cuestión de infraestructura, eficiencia operativa, accesibilidad a los puntos de instalación entre otras, las cuales son necesarias para la escalabilidad de esta. Añadido a lo anterior, es necesario hacer estudios previos del agua captada y que va a ingresar al sistema de tratamiento, ya que la concentración de iones y sales en el agua de mar puede afectar el rendimiento de proceso de desalinización. Con una alta concentración de iones se

aumenta el punto de ebullición y la presión necesaria para evaporar el agua, necesitando de estos estudios previos y durante la ejecución para optimizar las condiciones de funcionamiento, como la presión, temperatura y caudales, considerando las concentraciones de iones antes mencionada. Asimismo, el número de etapas, las presiones de las etapas, la tasa de transferencia de calor y el estudio de retorno. La adopción de un diseño adecuado garantiza la maximización de producción de agua dulce, reducir los costos y el consumo energético, la longevidad del sistema y la prolongación del funcionamiento de esta (Tareemi & Sharshir, 2023).

Como el sistema necesita supervisión, mantenimiento y limpieza de los sistemas cada que esté presente inconvenientes, cada que se inicia un nuevo proceso de desalinización se somete a un proceso de pretratamiento donde se emplea varios métodos que abordan los desafíos de las incrustaciones y el ensuciamiento dentro del sistema MSF. Estos métodos tienen con objetivo, eliminar o minimizar la presencia de impurezas y prevenir su deposición en superficies de transferencia de calor. La adopción de estas puede variar la calidad del agua de captación, las condiciones ambientales regionales, el diseño de equipos y necesidades operativas. Para manejar correctamente los problemas de incrustación y ensuciamiento y mantener la eficacia y fiabilidad a largo plazo del sistema de desalinización MSF, con frecuencia se requiere una estrategia integral que incorpore una variedad de procedimientos de pretratamiento (Tareemi & Sharshir, 2023).

2.2.1.3. Compresión mecánica de vapor (MVC): Esta tecnología de tratamiento utiliza un sistema de cabinas y un compresor que aumenta la presión y la temperatura progresivamente dentro de estas cabinas, evaporando el agua de mar que posteriormente se recolecta y viaja por un sistema de tubos horizontales dentro de los cuales se realiza la condensación para producir agua dulce (Ver **Figura 2.4.**) (Balaji et al., 2021; Oraby et al., 2025). Además del tratamiento de agua salada, esta tecnología se utiliza también para el tratamiento industrial de aguas residuales y otras aplicaciones a baja escala (Zhang et al., 2025).

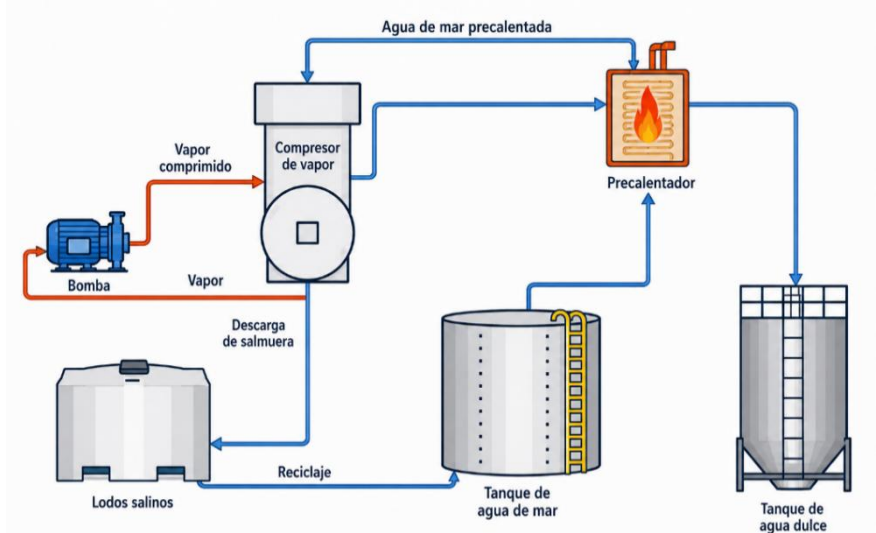


Figura 2.4. Proceso de desalinización por electrodiálisis. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Oraby, H. et al., 2025).

Si se compara esta tecnología con las tecnologías basadas en membranas, el MVC tiene un consumo energético 10 veces más alto que estas. Sin embargo, si se compara con las tecnologías MED y MSF, el consumo es notoriamente menor, entre un 15 a 50%, con costos de producción de aproximadamente 0,7 USD/m³, con un consumo energético de producción de 11.1 kWh/m³. Resaltando su importancia para la implementación en zonas donde el corte energético es muy alto o de acceso difícil o limitado. De igual manera, la eliminación de sólidos y contaminantes es eficiente, minimizando las preocupaciones ligadas a la calidad del agua dulce resultante de este proceso. El diseño y la configuración del MCV es compacto, de fácil operación y sostenible en el impacto del medio ambiente, gracias a que su generación de residuos es mínimo. Dentro de las desventajas que presenta esta tecnología está el alto costo de capital inicial para la puesta en marcha de este sistema, lo que puede convertirse en una limitación financiera para las comunidades afectadas, asimismo, este sistema requiere de un flujo de energía constante, lo que se vuelve un poco difícil de garantizar en zonas donde el acceso

es reducido o nulo al servicio de energía eléctrica o donde por problemas de infraestructura se presentan cortes de esta, por otra parte es fundamental la presencia de personal especializado que implemente correctamente esta tecnología a las condiciones cambiantes de cada comunidad, el entorno de trabajo de la planta, debido a la generación de ruido y la correcta operación de este sistema para minimizar el impacto al medio ambiente (Oraby et al., 2025; Tucker et al., 2024). Lo anterior debido a que se le debe dar un correcto manejo a la salmuera resultante, sometiéndola a procesos de desecho; en muchos casos el agua contenida en esta no es totalmente evaporada, condición necesaria para que la salmuera no quede pegada dentro de los conductos de desagüe. Esta tecnología es ampliamente conocida por diferentes autores como una tecnología costosa, debido a su alto consumo de energía.

Al igual que otras tecnologías térmicas, los costos del consumo eléctrico varían (excluyendo costos de mantenimiento, instalación, permisos etc.). Hay factores que influyen como el coeficiente total de transferencia de calor, el cual cambia debido a los materiales que conforman la infraestructura del sistema. Sin embargo, es destacada por su capacidad de tratamiento en aguas de alta salinidad, resaltando su eficacia y fiabilidad. Además, que poderse convertir en un sistema totalmente electrificado y con la capacidad de adaptación para un proceso libre de emisiones de carbono. Convirtiéndose en una alternativa para aplicaciones de pequeña y mediana escala; gracias a su diseño compacto (Tucker et al., 2024; Ahmed et al., 2025).

2.2.2. Sistemas de desalinización basado en membranas

Los procesos de membrana, especialmente la ósmosis inversa, se consideran la tecnología de más rápido crecimiento y la más extendida en la desalinización de aguas. Los procesos basados en ósmosis inversa o electrodiálisis generalmente muestran un mejor rendimiento termodinámico que los procesos térmicos. Sin embargo, las tecnologías térmicas requieren un menor consumo eléctrico y pueden utilizar calor a baja temperatura para funcionar. Además, en el caso de aguas de alimentación de alta salinidad, las tecnologías de membrana tienen una tasa de recuperación menor y, por tanto, un mayor consumo energético específico (Liponi, Wieland & Baccioli, 2020).

2.2.2.1. Ósmosis inversa (RO): El proceso de ósmosis inversa es uno de los métodos más comunes para la desalinización del agua de mar, utilizándose en aplicaciones residenciales, industriales, comerciales y militares (Dincer & Temiz, 2024). Este consiste en captar agua del mar que pasa inicialmente por un sistema de pretratamiento donde se emplean métodos de desinfección, coagulación, microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración (NF) para reducir los incrustantes antes de que lleguen a la membrana (Ahmed et al., 2025). Una vez terminado este proceso, el agua pretratada es impulsada por una bomba de presión hasta el sistema de membranas poliméricas semipermeables, aquí se separa el agua y los minerales disueltos. El agua desalinizada para al postratamiento, en esta etapa se cumple con los requisitos dependiendo del uso final de esta, ajustes de pH, remineralizar el agua con calcio y magnesio, eliminación de boro, desgasificación de dióxido de carbono y otros gases, al igual que la desinfección de otros microorganismos. Este proceso es necesario antes que el agua se distribuya, garantizando que el agua producida cumpla con los requisitos necesarios para las diferentes aplicaciones. De este proceso, se genera salmuera que se vierte nuevamente al mar o se utiliza para otras aplicaciones (Servicio de Evaluación Ambiental, 2023; Oraby et al., 2025).

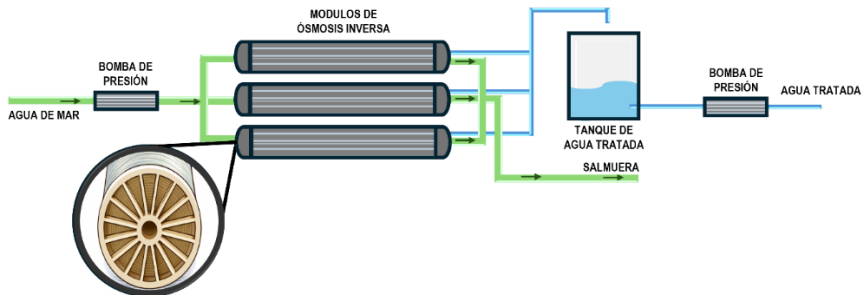


Figura 2.5. Ilustración de los principales componentes de un sistema de Ósmosis Inversa. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los módulos de ósmosis inversa se encuentran membranas fundidas como láminas planas que son colocadas entre el separador de alimentación y la malla de separación, ubicada en la parte superior y un separador permeado tejido

ubicado en la parte inferior. Estas laminas son ensambladas en forma de espiral enrolladas en los bordes y sellados para separar los canales de alimentación y el permeado, variando entre 0,07 y 0,08 mm, este sistema tiene una tasa de recuperación aproximada de 40 a 50% del total del agua captada, utilizando para esto un consumo energético de producción de 7,5 KWh/m³. Las membrana cada cierto tiempo tiene que ser sometidas a mantenimiento para evitar la formación de escamas inorgánicas y la bioincrustación en la membrana, buscando restaurar la permeabilidad y garantizar la vida útil de esta. Sin embargo, este proceso es poco práctico debido a su coste, todo el proceso técnico detrás de esto y las interrupciones en el proceso; optándose por emplear procesos de limpieza química para optimizar estos procesos de mantenimiento (Ahmed et al., 2025; Elfaqih et al., 2024).

Aunque la osmosis inversa es cuatro veces más eficiente energéticamente que los procesos térmicos, estos procesos al requerir cambio de membrana por el desgaste del uso, tienen mayores costes de consumo, al igual que, las limitaciones como la necesidad de personal especializado para su funcionamiento y mantenimiento, los requisitos de infraestructura, y desafíos como la durabilidad de las membranas, la resistencia a las incrustaciones, el consumo energético y la implementación a gran escala (Huang et al., 2024; Oraby et al., 2025).

2.2.2.2. Nanofiltración (NF): Estas membranas suelen ser poliméricas, asimétricas y consisten en una capa de soporte de baja resistencia con una capa superior que es porosa y funcionalmente activa; con un tamaño de poro de 1 nm tiene una alta resistencia a aniones multivalentes, pero es menos eficaz para repeler cationes multivalentes. Para la fabricación de estas membranas se utilizan nanopartículas de dióxido de titanio, plata, sílice y óxido de zinc, y su diseño varía, teniendo diferentes configuraciones en forma de lámina o enrollada como en espiral, tiene un costo de producción de aproximadamente 0,7 USD/m³ y un consumo energético de 4.49 KWh/m³ (Dani et al., 2022; Elfaqih et al., 2024). Esta ofrece ventajas en el proceso de desalinización, ya que esta al igual que las membranas de ósmosis inversa tienen un gran potencial en la separación de sales inorgánicas y pequeñas moléculas orgánicas. Así mismo, necesita de poca energía, el diseño de los equipos es sencillo y tiene una alta selectividad; Lo que hace que

sea ampliamente utilizada en sectores como la farmacéutica, tratamiento de aguas residuales, biotecnología e ingeniería alimentaria (Elma et al., 2023).

La tecnología de nanofiltración se ha utilizado comúnmente como pretratamiento para otros sistemas de desalinización como la ósmosis inversa y destilación flash multietapa, al integrar la nanofiltración a estos procesos se hace un sistema híbrido que mejora e incrementa la eficiencia y el rendimiento del proceso de desalinización, ya que este sistema de pretratamiento elimina en gran cantidad los sólidos totales disueltos y los microorganismos antes que entren a los otros sistemas, con esto los costes operativos asociados a mantenimiento y limpieza, que son muy altos se minimizan, al igual que los cambios por desgaste y bioincrustación (Ver **Figura 2.6.**)(Dani et al., 2022). Sin embargo, al ser utilizada en la etapa de pretratamiento, las membranas de nanofiltración sufren un gran desgaste (Variando según la calidad del agua captada) causado por el ensuciamiento de las membranas y por el uso operativo de este, haciendo que el sistema tenga una mayor demanda energética y, por ende, menor vida útil de las membranas, requiriendo de mantenimiento y limpieza. Por esto se ha adoptado el uso de métodos convencionales de tratamiento como la coagulación, adsorción y ozonización para minimizar el impacto negativo que genera al sistema de tratamiento. Sin embargo, el uso prolongado de estos hace que el sistema cree corrosión, haciendo que las paredes de este se endurezcan y se incruste una mayor cantidad de compuestos (Elma et al., 2023).

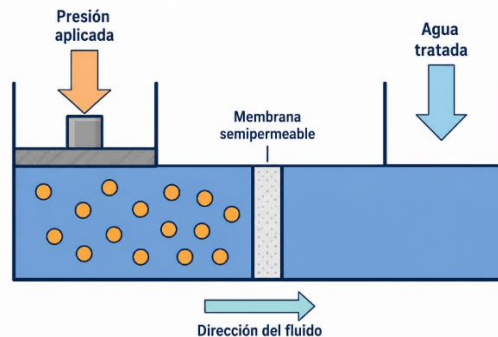


Figura 2.6. Proceso de desalinización con membranas de Nanofiltración. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.3. Electrodiálisis (ED): Este método se desarrolló a principios del siglo XX. Con la escasez de agua dulce en diferentes regiones del mundo; la electrodiálisis tomó una mayor participación en la mitigación de esta, teniendo aplicaciones a gran escala años después, Asemejándose mucho a la ósmosis inversa. Sin embargo, este método se determina como un proceso electroquímico de separación de membranas que utiliza un campo eléctrico para desmineralizar selectivamente el agua a través de una membrana de cambio iónico; lo que la hace diferente a otros procesos que utilizan presión o energía térmica (Ver **Figura 2.7.**).

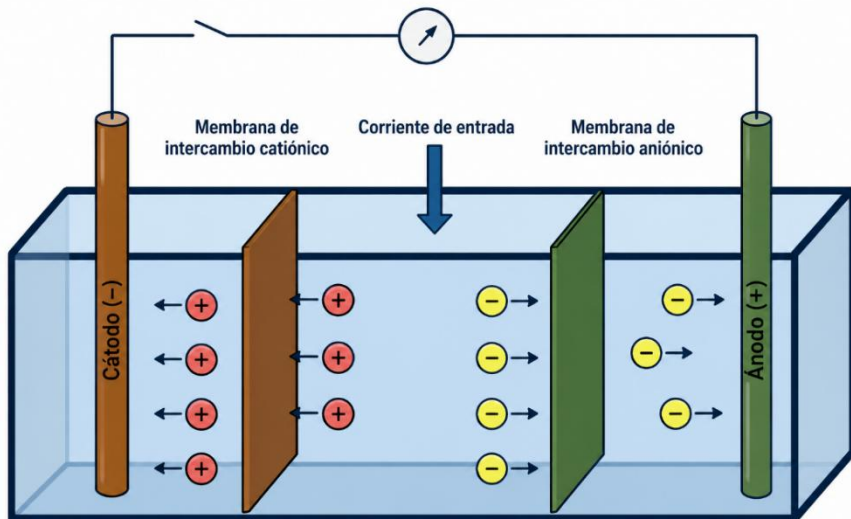


Figura 2.7. Proceso de desalinización por electrodiálisis. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Oraby et al., 2025).

Teniendo un consumo energético menor, aproximadamente $2,6 \text{ kWh/m}^3$ y una tasa de recuperación alta, siendo utilizada en diferentes sectores y aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales, la recuperación de recursos y la gestión de tratamiento de agua. Su diseño es modular, lo que permite que su configuración pueda ser descentralizada. Por otra parte, esta tecnología presenta desventajas similares a las anteriores tecnologías mencionadas que son basadas en

membranas, como altos costes de producción, rondando el 1,05 USD/m³, al igual que sus costes de mantenimiento y limpieza, ya que las membranas presentan ensuciamiento o desgaste por su uso, requiere de equipos especializados, lo que hace que la implementación en ciertas comunidades sea un proceso complejo (Mahmood et al., 2026; Oraby et al., 2025).

Por otra parte, la electrodiálisis se alinea con los principios de economía circular, ya que este método puede recuperar recursos como nutrientes, metales y demás compuestos, por ejemplo, la recuperación de fosfato y amoníaco de las corrientes de agua en sectores agroindustriales, limitando el uso de fertilizantes sintéticos. Asimismo, puede ser utilizado para mitigar la contaminación ambiental por metales presentes en vertimiento industriales. Aunque este método se emplee para el proceso de desalinización, es más conocido o utilizada para el tratamiento de aguas residuales; ya que, para utilizarse en el tratamiento de agua de mar, llega hasta cierto rango de sólidos totales disueltos (STD), en el caso de la electrodiálisis, tiene un mejor rendimiento en el tratamiento de agua salobres donde se rondan los 1.000 a 10.000 mg/L de STD (Mahmood et al., 2026).

El rendimiento de los sistemas de electrodiálisis varía según los parámetros operativos necesarios, como el voltaje y la velocidad del flujo, y las propiedades de la solución como la concentración iónica y la temperatura. Lo que hace que los parámetros y propiedades antes mencionadas se conviertan en un desafío para la optimización de los procesos y un modelado predictivo del rendimiento, siendo en muchos casos necesario sistemas avanzados de computación para el diseño y el control de estos sistemas (Wang et al., 2026).

2.2.3. Sistemas de desalinización por cristalización

2.2.3.1. Desalinización por congelación (FD): La desalinización por congelación es una tecnología por cristalización donde se genera un cambio de fase mediante el enfriamiento del agua salada hasta su congelación, convirtiéndolo en hielo y dejando la salmuera aparte, para posteriormente derretir el agua congelada y obtener agua dulce (Ver **Figura 2.8.**); lo que a simple vista nos da a entender que el proceso es más óptimo en cuestión de separación de la sal disuelta en el agua de mar. En comparación con otras tecnologías como las térmicas y las basadas en

membranas, el sistema de congelación tiene una alta tolerancia a la corrosión y a las incrustaciones; debiéndose a las bajas temperaturas, que mitigan hasta cierto punto estos inconvenientes, porque, aunque no se presenten con mayor medida, el sistema aun así debe ser sometido a procesos de limpieza. Lo que hace que sus costos de mantenimiento y limpieza sean bajos. Asimismo, el consumo energético es bajo, haciendo que los costes operáticos sean menores, aproximadamente entre 2 – 3 USD/m³ (Oraby et al., 2025), generando una reducción significativa de las emisiones de carbono al medio ambiente, una producción menor de residuos salinos y elimina la necesidad de tratamientos químicos.

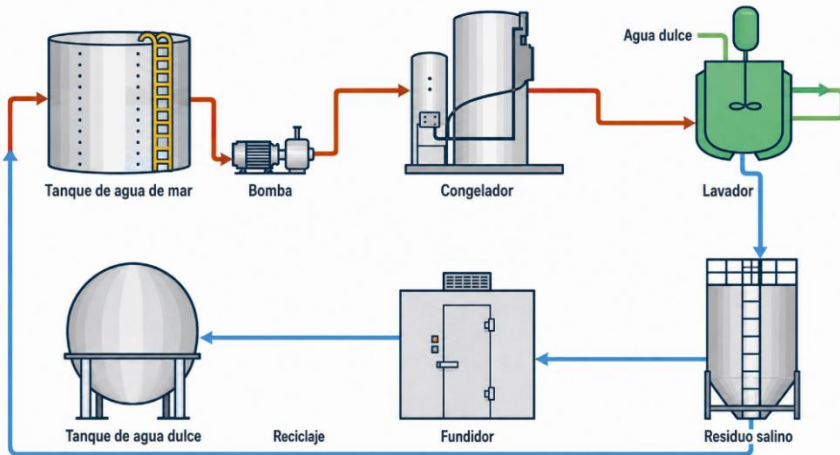


Figura 2.8. Diagrama de flujo del proceso de desalinización por congelación. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Oraby, H. Et al. 2025).

Por otra parte, este método presenta desventajas como que su implementación necesita condiciones del entorno específicas, como el sistema emplea bajas temperaturas para el proceso de desalinización, es necesario que el lugar donde se implemente tenga una temperatura baja; ya que la temperatura para el proceso de congelación puede no alcanzarse fácilmente, generando un mayor consumo energético. Además, este método no registra aplicaciones a escala comercial, debido a que se encuentra en fases iniciales de desarrollo, lo que limita sus

aplicaciones comerciales, y su uso tiene una mayor aplicación en laboratorios y pequeñas plantas piloto. Lo anterior, debiéndose a los altos costes de capital inicial y la necesidad de personal capacitado para los procesos de postratamiento como la separación y fusión del hielo, convirtiéndose en una solución poco asequible para muchas comunidades, principalmente aquellas que se encuentran en países en desarrollo. De igual manera, cuando sucede el proceso de congelación, las sales pueden quedar atrapadas en la generación del hielo, lo que posteriormente es difícil de separar y requiere de métodos de purificación postratamiento como lavado, centrifugación entre otras (Zhao et al., 2025; Janajreh et al., 2023; Zheng et al., 2019).

2.2.3.2.- Desalinización basada en hidratos (HBD): Esta tecnología de desalinización basada en hidratos se propuso inicialmente en el año 1942, profundizándose años después, ampliando el panorama en la investigación y el desarrollo de esta. El principio de esta tecnología se basa en un cambio de fase, de líquido a sólido, lo anterior sucede cuando el agua de mar se pone en contacto con moléculas invitadas (gas formador de hidratos) en presiones elevadas y bajas temperaturas, produciendo así clatratos, que se caracterizan por tener disposiciones cristalinas y no estequiométricas. La sustancia producida recibe este nombre ya que la estructura que se forma se asemeja a la de una jaula; como su significado en latín. Esta tiene cavidades que encapsulan moléculas gaseosas. Los gases encapsulados tienen la función de estabilizar la estructura general, lo que hace que se formen cristales sólidos de hidratos de gas (**Figura 2.9.**). Cuando su aplicación se encamina al tratamiento de agua de mar, se forman estos cristales, las jaulas de estos tienen un tamaño que oscila entre 0,395 y 0,571 nm, haciendo que las sales y iones disueltos sean excluidos de las jaulas formadas. Los cristales sólidos de hidratos están confirmados de aproximadamente entre el 85 y 94 % es agua y un 6 a 15% está conformado del formante de hidratos de gas, Con una eficiencia de desalinización superior al 80 % y una tasa de recuperación de agua superiores al 30 %. Por otra parte, el tamaño, tipo y forma del formador de hidratos influye mucho en la estructura de los hidratos, lo que hace que cambien entre tamaños y formas diferentes, estos se pueden caracterizar en 3 configuraciones diferentes: Estructura cúbica, estructura cúbica II y estructura hexagonal H (Sun et al., 2025; Montazeri & Kolliopoulos, 2022; Jalili & Kolliopoulos, 2025). Para separar el agua dulce de los hidratos se utilizan métodos mecánicos,

despresurización, centrifugación y extrusión, estimulación térmica o también por medio de la combinación de los anteriores; mostrándola como una alternativa eficiente para la desalinización de agua de mar (Jalili & Kolloiopoulos, 2025).

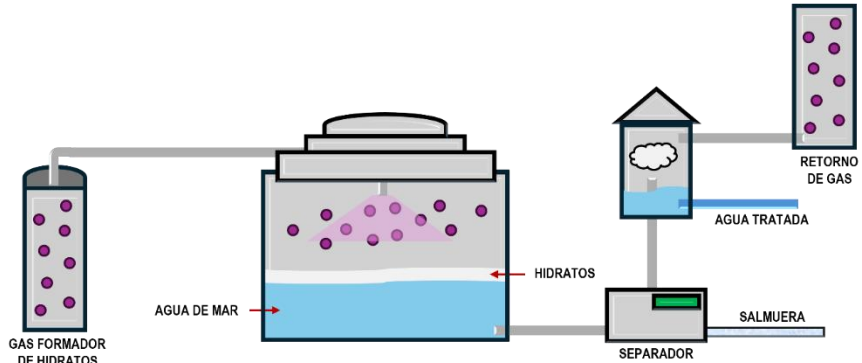


Figura 2.9. Sistema de desalinización basada en hidratos. Fuente: Elaboración propia.

Esta tecnología tiene un coste de producción estimado de 0,46 y 0,52 USD/m³, siendo competitivo si se compara con otras tecnologías de desalinización en el mercado, no tiene una adopción comercial y presenta numerosos desafíos que limitan su implementación de forma industrial, como la dependencia de condiciones específicas de temperatura y presión, lo que hace que sea difícil encontrar moléculas invitadas que sean adecuadas para la formación de los hidratos; utilizándose sustancias refrigerantes como los hidroclorofluorocarbonos (HFC) de tipo R141b y R152a como moléculas invitadas para la desalinización basada en hidratos. Sin embargo, estas sustancias tienen efectos nocivos para los organismos acuáticos, problemas de seguridad ambiental y la disminución de ozono. Lo que hace que se siga investigando moléculas invitadas para la mitigación de estos riesgos. Asimismo, se ve limitado en la eficiencia en la formación de hidratos es baja, la separación de la hidratación y la salmuera no es totalmente eficiente, y los formadores de hidratos no son del todo reciclables, y altos costes de capital inicial (Zheng et al., 2019; Sun et al., 2025). Para optimizar la formación de hidratos, se emplean promotores químicos, que mitigan los desafíos que asociados al proceso de desalinización. Aunque el sistema puede operar sin ayuda

de estos promotores, estos ayudan significativamente en el proceso. Estos pueden clasificarse en dos categorías: promotores de hidratos termodinámicos (PHT) y promotores de hidratos cinéticos (PHC) (Jalili & Kolliopoulos, 2025).

Tabla 2.1. Clasificación de promotores químicos, definición y características.

Promotor	Definición	Características
Promotores de Hidratos Termodinámicos (PHT)	Son aditivos usados para modificar las condiciones de estos y mejorar la eficiencia general en la formación de hidratos.	Estos se pueden clasificar en promotores termodinámicos de hidratos de clatrato (PHTC) y promotores termodinámicos de hidratos semi-clatratos (PHTS-C). Tanto los PHTs y PHCs se pueden utilizar en combinación para obtener ventajas y mitigar los defectos de tiene cada uno. Grupo de compuestos utilizados: - Tetrahidrofurano - Propano - Ciclopentano - Bromuro de tetrabutilamio
Promotores de Hidratos Cinéticos (PHC)	Son aditivos químicos que son utilizado en bajas concentraciones (inferiores a 10.000 ppm). Como tensioactivos y otros materiales de alta superficie, incrementando la tasa de crecimiento y el aumento de la absorción de gases.	Cuentan con características que mejoran las interacciones interfaciales entre las fases gaseosa y líquida sin alterar el equilibrio de los hidratos. Grupo de compuestos utilizados: - Tensioactivos - Aminoácidos - Nanopartículas - Micro-nanoburbujas

El primer grupo de compuestos (PHT) tienen una alta volatilidad lo que hace que se añadan procesos adicionales para la recuperación por el método de separación para minimizar las pérdidas; añadir procesos adicionales para la recuperación es bastante costoso, lo que hace que en la práctica se obtén por otros métodos, estos

emplean sales orgánicas de amonio cuaternarias (No volátiles) como el bromuro de tetrabutilamonio que tiene una alta capacidad de formador de hidratos iónicos, ya que estos compuesto pueden alterar las jaulas de agua y formar hidratos semi-clatratos a presión y temperatura ambiente, lo que hace que pueda atrapar de manera eficiente que otros métodos utilizados dentro de este método de desalinización; este último método se clasifica dentro del segundo grupo de compuestos utilizados para este.

Por otra parte, los semi-clatratos están compuestos por estructuras cristalinas que se forma a partir del agua y moléculas hidrofóbicas. Estás a su vez, cuentan con propiedades que permiten alterar parcialmente la estructura de las jaulas, haciendo que las moléculas hidrofóbicas interactúen con la cavidad hidratada y sustituyan las moléculas de agua. Al compararse los semi-clatratos con los clatratos convencionales, se evidencia que los semi-clatratos pueden utilizarse como moléculas invitadas dentro de las jaulas al igual que como un huésped, lo que hace que dentro de la estructura se puedan incorporar otras moléculas y así crear nuevas propiedades en el clatrato (Jalili & Kolliopoulos, 2025).

2.3. Nuevos avances

2.3.1. Desarrollo de membranas con nanomateriales: Diversos estudios destacan que el añadir nanomateriales a membranas con tamaño, la forma, la porosidad y la concentración adecuados, las nanoestructuras pueden mejorar las características morfológicas de las membranas de NF y OS, incrementando así la permeabilidad, selectividad y propiedades antiincrustantes. Asimismo, es posible adicionar diferentes funcionalidades a las membranas, como se muestra a continuación (Ver **Tabla 2.2.**).

Aunque los nanomateriales individuales aportar mejorar a las propiedades de la membrana, no pueden proporcionar todos los beneficios simultáneamente. Es por esto por lo que se han propuesto nanomateriales híbridos que combinen las propiedades de cada uno de estos y así brindarle un aumento a la eficiencia de las membranas. A continuación, se muestra algunos de los nanomateriales y su beneficio para las membranas en el tratamiento de agua de mar (Santo & de Souza, 2024).

Tabla 2.2. Nanomateriales utilizados en la fabricación de membranas para desalinización.

Nanomateriales	T. P (nm)	M. R	C. S (ppm NaCl)	T. M	R. S (%)
NPs de TiO ₂	10	0.0125 wt/v% (O)	2000	RO	97.9→97.7
NPs de SiO ₂ fluorinado	150–200	0.12 wt/v% (O)	2000	RO	96.0→98.6
NPs de CeO ₂	54	0.01 wt/v% 100 mg/L (A)	2000	RO	98.7→98.0
NPs de CeO ₂	-	0.2 wt/v% (O)	2000	NF	85.5→94.8
FeO	50	0.2 wt/v% (O)	2000	NF	66.2→92.1
NPs de Ag	-	0.2 wt/v% Precarga PSf	2000	RO	97.4→99.1
NTs de (HNT)-COOH	28 (diámetro interno)	0.05 wt/v% (O)	3000	RO	99.1→99.1
OG	-	0.00087 wt/v% Precarga de PES	1000	NF	94→95.8
OG	-	0.0013 w/v Precarga de PES	1000	NF	95.0→96.0
EFCP	150	0.02 wt/v% (A)	20 ppm RhodamineB dye	NF	99.0→97.5 0
OG cubierto con ácido acrílico	-	0.0013 wt/v% Precarga de PSf	1000 ppm Na ₂ SO ₄	NF	97.00→98.69
Liposomes	130–160	0.02 wt/v% (A)	1000 ppm MgCl ₂	NF	90.1→95.9

NDs	50	0.02 wt/v% (A)	1420 ppm Na ₂ SO ₄ (10mM)	NF	98.0→97.3
NCs de Cel-Carb	100–500	0.05 wt/v%(A)	2000 ppm Na ₂ SO ₄	NF	95.0→98.3
CM-Carb	50–200	0.01 wt/v% (A)	1169 ppm NaCl (20mM)	-	-

T.P: Tamaño promedio; M.R: Mejor rendimiento; C.S: Concentración de la solución; T.M: Tipo de membrana; R.S: Rechazo de sal.

NTs: Nanotubos de carbono; NPs: Nano partículas; NCry: Nanocristales; NDs: Nanodiamantes; OG: Óxido de grafeno; EFCP: Esferas de fibras de carbon poroso; Cel-Carb: Celulosa carboxilada; CM-Carb: Carbón multipared carboxilado.

NF: Nanofiltración; RO: Osmosis inversa. PES: Polietersulfona; PSf: Polisulfona.

Dentro de los nanomateriales utilizados está el grafeno que se divide en prístino (pGO), Óxido de grafeno (OG o GO del inglés) y óxido reducido de grafeno (rGO). Sus características se tratan en la **Tabla 2.2**. El GO ayuda a que la membrana mejore sus propiedades en permeabilidad y selectividad, debido a que hace que se creen espacios entre las diferentes capas de la membrana (Otaru et al., 2026). Además, siendo mecánicamente confiables y económicas. Por otra parte, este mismo se clasifica en de grafeno nanoporosos ultrafinos y con canales de agua bidimensional en forma de capa apilada. El primero al tener un grosor atómico de aproximadamente un tercio de nanómetro tiene mayor permeabilidad del agua, evidenciándose así un rechazo a la sal; aproximadamente del 100%. Sin embargo, se necesita crear constantemente agujeros subnanométricos sin defectos con un radio de aproximadamente de 0,45 nm en una sola capa de grafeno, lo que representa un reto y problemas de escalabilidad, por esta razón su aplicación es limitada. En el caso del segundo, estas tienen defectos al momento de apilarse ya que no siempre quedan perfectamente alineadas haciendo que aparezcan espacios irregulares, haciendo que el tamaño de los poros no sea el deseado, haciendo que la selectividad sea baja, es decir, las sales o contaminantes puedan pasar sin ser filtrados, asimismo, estas capas pueden separarse haciendo que la estructura sea irregular o pasa lo contrario, se comprime más de lo deseado haciendo que los canales se reduzcan (Tiwary et al., 2024).

Tabla 2.3. Características del grafeno.

Material	Características
Grafeno prístino	Su estructura tiene un solo átomo de espesor (Por eso recibe el nombre de estructura 2D) formada por átomos de carbono que se organizan de forma hexagonal (Estructura semejante a la de un panal de abejas). Con una alta rigidez, conductividad y área superficial. Haciendo que sea un material hidrofóbico y químicamente inerte.
Óxido de grafeno	Este material es el resultado de modificar el grafeno, siendo necesario para esto grupos funcionales que contienen oxígeno (Incluyendo partes de hidroxil, epoxi, carbonilo y carboxilo). Convirtiéndolo en hidrofílico y químicamente activo. Permitiendo atrapar contaminantes del agua, mediante mecanismos electrostáticos, enlaces de hidrógeno y coordinación química.
Óxido de grafeno reducido	Este material se ubica intermedio a los dos anteriores, ya que su estructura no es tan rígida como la del grafeno, pero tampoco tan funcional como el óxido de grafeno. Este se obtiene, mediante la eliminación parcial de grupos que contienen oxígeno. Mejorando así la conductividad y haciendo que las capas están más compactas; dejando de igual manera defectos en la estructura y grupos funcionales dispersos. Lo que hace que pueda tener sitios activos y se pueda tener interacción con contaminantes.

Por otra parte, se emplean otros nanomateriales para la modificación y creación de membranas híbridas. El dióxido de titanio (TiO_2) es una nanopartícula conocida por sus propiedades de alta estabilidad química, baja toxicidad y por sus propiedades fotocatalíticas y disponibilidad. Las membranas modificadas con TiO_2 son ampliamente utilizadas en la desalinización y tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, a momento de su aplicación tiende a aglomerarse, es decir, no se dispersa uniformemente, sino que se adhieren entre sí formando grupos, haciendo que la membrana tenga cambios negativos en la morfología y con esto disminuyendo el rendimiento y la capacidad de filtración. Es por esto, que se utilizó el Óxido reducido de grafeno con TiO_2 a una membrana de Osmosis inversa se nota una favorable retención de sales a comparación de solo utilizar la membrana, lo

que incrementa la permeabilidad gracias a la capacidad aumentada de hidrofilia del TiO_2 y los grupos funcionales hidroxilos, además es importante resaltar que el rGO o GO sirve como soporte para la TiO_2 lo que hace que estas partículas no se aglomeren, distribuyendo mejor las nanopartículas en la membrana. Lo anterior, ocurre cuando se utiliza 0,02% del compuesto. Caso contrario sucede cuando se añade más de esto, por ejemplo, al añadir 0,03% del peso a la membrana los poros tienen una obstrucción leve que hace que el flujo disminuya y así su rendimiento en la retención de sales.

Otro punto importante de esta combinación, el *trade-off* de las membranas de osmosis inversa, no está presente en esta nueva membrana mejorada, haciendo que si la permeabilidad aumenta el rechazo a la sal también (Esto cuando se utiliza 0,02% del peso), haciendo que tenga una capa activa (poliamida) (Safarpour et al., 2015). Asimismo, otras nanopartículas y compuestos como el óxido de cerio (CeO_2), la sílice modificada (3-aminopropil) trietoxisilano, ácido aspártico y hexametildiamina), nanotubos de carbono entre otros, que aportan propiedades como el incremento de la hidrofilia, porosidad, rugosidad, carga superficial, la permeabilidad al agua son afectar la selectividad de las membranas (Tayel et al., 2023).

2.3.2. Desarrollo de estrategias tecnológicas térmicas: Las tecnologías de desalinización mencionadas anteriormente son denominadas “Plantas de un solo propósito” ya que su consumo de energía o enfoque se centra en la producción de un solo producto. Lo que hace que su coste energético en el proceso de desalinización sea un factor decisivo al momento de medir la viabilidad económica, esto debido a que demandan entre muchas otras cosas, una gran cantidad de energía, la cual es principalmente suministrada por fuentes fósiles no renovables y no sostenibles; lo que hace que dependan directamente del coste por metro cubico de agua producida; independientemente de su competitividad, lo que limita su desarrollo y expansión a gran escala. Bajo esta perspectiva, se han desarrollado e integrado nuevos tipos de plantas llamados “Plantas multipropósitos” que aprovechan fuentes energéticas de bajo coste, como el calor residual, la energía solar y geotérmica, mejorando así el rendimiento del proceso de desalinización y contribuyendo a la reducción de los costos totales de producción. Estas plantas también se pueden acoplar a otros sistemas como recolectores térmicos y de

almacenamiento de calor, que en conjunto optimizan la eficiencia y el rendimiento en el proceso de desalinización, produciendo energía eléctrica que puede ser utilizada para el suministro doméstico o industrial, al igual que su reutilización dentro de otros sistemas de desalinización (Ghorbani et al., 2025).

Por otra parte, también están las plantas de ciclo combinado, que utiliza generadores de gas y vapor para producir, energía. El proceso interno de estas plantas es utilizar gas natural que se combustiona dentro de la turbina de gas, generando electricidad, subproducto de este proceso se generan gases a alta temperatura que son aprovechados dentro de un recuperador de calor para producir vapor. Este a su vez, impulsa otra turbina (Que funciona a vapor) para generar electricidad adicional y mejorar significativamente la eficiencia global de la planta. El vapor genera posteriormente es de baja presión, haciendo que no pueda ser reutilizado, sino que se utilice para alimentar con procesos de desalinización térmicos, como el MSF y MED; aprovechando el calor residual para impulsar los procesos de desalinización, mejorando la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental. Un reflejo de esto es una central eléctrica de ciclo combinado ubicada en Irak, que combina calor y energía logrando una eficiencia de 67% y un costo de producción de agua de aproximadamente 0,74 USD/m³; demostrándose las mejoras en cuestión de eficiencia en los sistemas combinados a comparación de sistemas independientes de desalinización.

Por otra parte, estudios desarrollan estrategias para la adaptación de sistemas trigeneracionales donde se incluya RO y la refrigeración por absorción, con el objetivo de mejorar aún más la eficiencia en la producción de energía y agua (Muthumeenal et al., 2026). Asimismo, se ha implementado sistema de energía fotovoltaica para la generación y suministrar calor a plantas de desalinización térmica, como las plantas de ciclo combinado y MED, produciendo aproximadamente 0.033 m³/s de agua dulce, también se ha demostrado que minimiza los costes de producción y el impacto ambiental, desarrollando sistemas alternativos o híbridos que están tomando mayor relevancia en los últimos años, debido a que ofrecen una solución sostenible para la producción de agua dulce, mejorando la producción y permitiendo una descarga de líquidos cero (Ghorbani et al., 2025). Algunos sistemas híbridos encontrados en la literatura son MED-TVC impulsado por la recuperación de calor residual, MED-TVC y un ciclo

de cogeneración combinada de refrigeración, calefacción y energía utilizando energía solar y geotérmica, Humidificación-Deshumidificación-Destilación por membrana de contacto directo alimentado por energía solar, desalinización por adsorción y destilación multiefecto con ciclos de energía y refrigeración, También se ha empleado un ciclo Rankine alimentado por biomasa con ayuda de un electrólizador y MED para producir energía eléctrica y térmica, hidrogeno y agua dulce, y los sistemas de tipo solar-biomasa con un sistema híbrido de cogeneración solar-residuos y combustibles fósiles; los sistemas híbridos han demostrado una producción sostenible a partir de la optimizas de sistemas térmicos y fuentes renovables (Ghorbani et al., 2025; Mousavi Rabeti et al., 2026).

2.4. Usos a nivel Colombia de esas tecnologías

Colombia es considerado un país rico en biodiversidad, recursos naturales y una gran capacidad hídrica, con 6 veces mayor al promedio mundial y aproximadamente 3 veces el rendimiento promedio de Latinoamérica. Además de tener el 50% de los páramos del mundo; considerados como las principales “fábricas de agua”. Sin embargo, con el cambio climático y las actividades antropogénicas se ha ejercido una mayor presión sobre el recurso hídrico, lo anterior debido a la menor oferta en áreas hidrográficas, la interrupción del ciclo del agua, la disminución de la calidad y el uso ineficiente y la débil administración del recurso; lo que hace que cerca del 29% (~ 13,8 millones personas) de la población Colombiana no tenga acceso a agua potable para el consumo humano (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023; CRA, 2024). El ministerio de igualdad y equidad identifica los departamentos que tienen una mayor priorización debido a las brechas existente en el acceso a agua potable (ver **Figura 10**), las áreas rurales de los departamentos son los más afectados, ya que menos del 30% de los hogares tienen acceso a acueducto. Añadido a esto, la población indígena y afrodescendiente el 62% y 32% respectivamente no cuenta con acueducto. No obstante, las comunidades que disponen de acueducto no tienen garantía que el agua suministrada por este sea apta para el consumo, de igual forma la cantidad no es suficiente y su frecuencia es insuficiente – En su defecto contar con Disponibilidad del recurso hídrico – lo que a nivel nacional resulta en que 12% de los hogares urbanos y 35% de los rurales tienen acueducto, pero la disponibilidad no es suficiente; esto se puede caracterizar con los requisitos diarios

estipulados por la Organización Mundial de la Salud donde se necesitan mínimo de 50 a 100 Litros/Persona, necesarios para cubrir las necesidades básicas de higiene y consumo (Ministerio de Igualdad y Equidad, 2025). Sin embargo, Colombia por medio del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) estipula la cantidad de agua según el nivel de complejidad territorial (ver **Figura 2.11.**) (Ministerio de Vivienda, 2017).

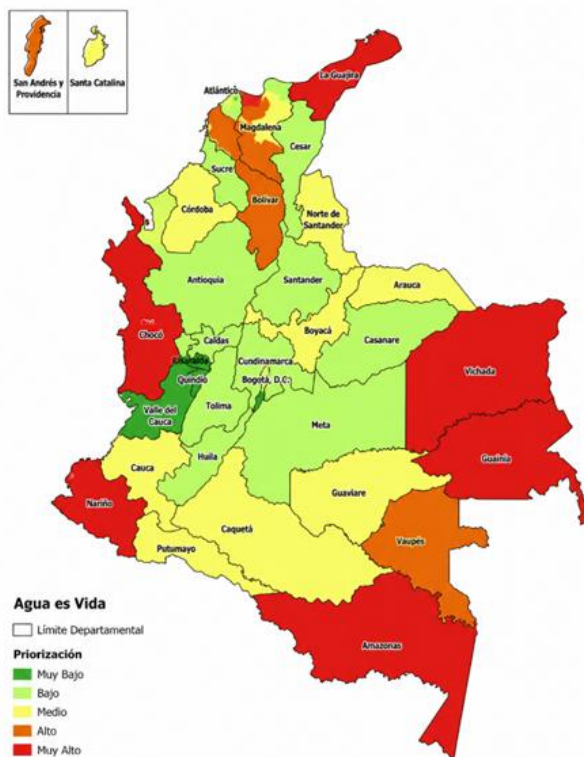


Figura 2.10. Departamentos priorizados por su falta de acceso a agua potable. Fuente: Elaboración propia (adaptado de Programa agua es vida).

Nivel de complejidad territorial	Clima	Requisito hídrico (Por día)
BAJO	 Climas fríos y templados	90 Litros/Persona
	 Clima cálido	100 Litros/Persona
MEDIO	 Climas fríos y templados	115 Litros/Persona
	 Clima cálido	125 Litros/Persona
ALTO	 Climas fríos y templados	140 Litros/Persona
	 Clima cálido	150 Litros/Persona

Figura 2.11. Departamentos priorizados por su falta de acceso a agua potable. Adaptado de: Programa agua es vida. Fuente: Elaboración propia (adaptado de: Resolución 0330 de 2017: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)).

Los municipios con priorización muy alta son aquellos que no cuentan con infraestructura (Acueducto y alcantarillado) para el suministro de agua, para esto se han desarrollado proyecto municipales y gubernamentales para la instalación de sistemas de tratamiento de agua y desalinización. En el caso específico de los sistemas de desalinización, se evidencia una implementación de esta principalmente en las zonas costeras del país; debido a la fácil disponibilidad de agua de mar. El diseño y la cantidad de producción de agua de estos sistemas de desalinización varían según el tamaño de la población y otros aspectos operacionales como la disponibilidad de energía, calidad de la fuente de agua, accesibilidad al sitio, viabilidad estacional, infraestructura existente, marco legal y normativo, y costos y viabilidad económica (Grueso-Domínguez et al., 2019). A nivel nacional los departamentos costeros que cuentan con sistemas de desalinización son La Guajira, la Isla de Providencia y San Andrés Isla. Los proyectos ubicados en cada uno de estos se muestran a continuación en la **Tabla 4, 5 y 6.**

Tabla 2.4. Relación de plantas desalinizadoras en el departamento de La Guajira.

La Guajira		
Ubicación	Capacidad de producción (m ³ /día)	Población abastecida (Personas)
Cabo de la vela	350	7.000
Siapana	500	10.000
Wotocherrain	30	600
Merra	50	1.000
Kasiwolin	80	1.600
Apiamana	260	5.200
Los cocos	20	400
Cardón	20	400
Puerto nuevo	40	800
Puerto estrella	260	5.200
Camino verde	100	2.000
Punta espada	40	800
Poropo	40	800
Parijen	30	800
Guayabal	40	600
Nazareth	500	10.000
Uribia y Castillete	2.020	40.400
Total	4.380	87.600

Fuente: <https://tecnoaguas.com.co/showcase/plantas-de-tratamiento-de-agua-la-guajira>

Tabla 2.5. Relación de plantas desalinizadoras en la Isla providencia.

Isla providencia		
Ubicación	Capacidad de producción (m ³ /día)	Población abastecida (Personas)
Agua Dulce	450m ³ /día	N/A
Agua Mansa	600m ³ /día	N/A
Total	1.050	

*<https://tecnoaguas.com.co/showcase/planta-desalinizadora-agua-mansa-providencia> | <https://tecnoaguas.com.co/showcase/case004>

Tabla 2.6. Relación de plantas desalinizadoras en San Andrés Isla.

San Andrés Isla		
Ubicación	Capacidad de producción (m ³ /día)	Población abastecida (Personas)
Lox Bighth	2.160m ³ /día	23.000 personas
Total	2.160	23.000

*<https://tecnoaguas.com.co/showcase/planta-desalinizadora-san-andres-islas>

El departamento de La Guajira se estima de tiene una población de 1.0570252 habitantes para el 2024, de las cuales 87.600 personas tienen acceso a agua potable. Sin embargo, aunque cuentan con la planta de desalinización, gran parte del departamento no cuenta con redes de distribución adecuada, lo que requiere de carrotanques para el suministro de agua (Ministerio de Salud y Protección Social, 2024; Grueso-Domínguez et al., 2019). La isla de san Andrés y providencia tiene una población total de 62.269 habitantes para el año 2023, la planta de desalinización ubicado en Los Bighth suministra agua a 23.000 de las 62.269 personas que habitan en la isla, abasteciendo parcialmente la demanda hídrica (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2023).



2.5. Relación con los ODS

El crecimiento de la población mundial y el cambio climático ejerce una alta demanda sobre el agua dulce para su uso doméstico, agricultura, industria entre otras, que incrementan la presión sobre los recursos hidrográficos; que en la mayoría de los casos es limitado. Generando un deterioro de la calidad del agua, especialmente en países en vía de desarrollo (Van Vliet et al., 2021). Con el contexto actual de los crecientes desafíos ambientales, sociales y económicos, el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías ha generado un aporte significativo en el cumplimiento de los ODS. Los cuales, buscan promover el crecimiento económico y la protección al medio ambiente (Griggs et al., 2013).

Las diferentes tecnologías y sistemas mencionados anteriormente, muestra la importancia de los métodos de desalinización y la indudable necesidad de esta en las regiones donde carecen de agua potable para su saneamiento básico.

Convirtiéndose en el medio para alcanzar las metas de los ODS y, además, transformar los modelos de desarrollo hacia dinámicas sociales más equitativas, resilientes y ambientales (Schwab, 2016).

Tabla 2.7. Aporte de las tecnologías de desalinización en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

ODS	Características
	<p>Las tecnologías de desalinización terminas, basadas en membranas y por cristalización desempeñan un papel fundamental en el aseguramiento del saneamiento de agua potable a una extensa cantidad de personas a nivel mundial; cumpliendo con el ODS 6. Los nuevos avances de estas tecnologías y el aprovechamiento de aguas salobres y saladas brindan una solución para la escasez y mejora del acceso al recurso vital en las regiones más vulnerables (Aydin et al., 2025). Ampliando el acceso al agua potable y mejorando la seguridad hídrica, y el fortalecimiento a la resiliencia climática (Shatat & Riffat, 2014).</p>
	<p>Las tecnologías de desalinización basadas en procesos de membrana han contribuido al desarrollo e integración de nuevas tecnologías energéticas con una eficiencia más alta, que permite reducir el consumo energético, mejorando así su viabilidad técnica y económica (Ghaffour et al., 2013). Por otra parte, contribuyen a la transición energética hacia energías más limpias y renovables como la eólica y la solar. Con esto se reduce la huella de carbón de los procesos de desalinización especialmente en regiones donde no se cuenta con suministro frecuente de energía (Shatat & Riffat, 2014). No obstante, el diseño de sistemas híbridos disminuye el consumo eléctrico pero el proceso de desalinización sigue siendo un proceso que demanda mucha energía.</p>

2.6. Conclusiones

Las tecnologías de tratamiento de agua de mar surgen como una solución a la escasez de agua potable y la demanda hídrica que se presenta en la actualidad a

nivel mundial. Con este estudio se evidencia las ventajas y limitaciones que presentan cada una de las tecnologías térmicas, de membranas y cristalización frente a condiciones energéticas, económicas y ambientales. Además, de tener características únicas en cada una de estas. Sin embargo, dentro de las limitaciones que presentan está el alto consumo energético y la importancia de la gestión ambiental de a la salmuera generada en cada uno de los procesos.

La integración y desarrollo de sistemas híbridos y sistemas de recuperación energética ha influenciada en la sostenibilidad del proceso de desalinización. No obstante, todavía existen desafíos como los altos costos operativos, mantenimiento de equipos, entre otros; mostrando que todavía es necesario seguir desarrollando nuevas alternativas y mejoras para mitigar cada uno de estos desafíos. En el contexto colombiano, especialmente en las regiones costeras como La Guajira, San Andrés y Providencia, los sistemas de desalinización han contribuido al abastecimiento de agua potable a comunidades vulnerables, mostrando la importancia de la cobertura de la infraestructura de acueducto y el acceso equitativo al recurso hídrico; enlazando la importancia de tecnologías para el suministro de agua dulce y las políticas públicas y de inversión en estas regiones desatendidas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Mindtech s.a.s., la Universidad del Valle, la Universidad de Córdoba, Polymeiker s.a.s., MT-Solsosting s.a.s., Instituto de Ciencia y Tecnología Analítica Golden-Hammer s.a.s. por los fondos suministrados en el marco del proyecto MT-012025 (C.I. 71408 Univalle) - Convenio MT-AFICAT-202501. Asimismo, agradecen al Departamento Nacional de Planeación de Colombia a través del Sistema General de Regalías por los recursos suministrados en el marco del proyecto BPIN 2020000100261.

Referencias

Ahmed, M. A. M., Ben Mansour, R., Shakeel, M. R., & Zubair, S. M. (2025). Efficient atmospheric water generation using mechanical vapor compression: An

improved system for sustainable freshwater production. *Thermal Science and Engineering Progress*, 62, Article 103637. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.103637

Ahmed, M. A., Mahmoud, S. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2025). The Persistent Challenge of Biofouling in Reverse Osmosis Desalination: A Review of Characterization, Control, and Future Directions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236, Article 599. DOI: 10.1007/s11270-025-08179-5

Al-Hamzawi, H. A. H., & Al Sailawi, A. S. A. (2025). Optimized multi-generation system for sustainable desalination and power production using solar-driven Multi-Effect Distillation (MED) in Basra, Iraq. *Energy for Sustainable Development*, 85, 101684. DOI: 10.1016/j.esd.2025.101684

Aydın, M., Tunç, K. M., & Güngör, M. E. (2025). Exploration of the reverse osmosis desalination process by explainable machine learning to support sustainable development goal 6: Clean water and sanitation. *Journal of Cleaner Production*, 533, 146979. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.146979

Balaji, D., Dhinesh, G., Phani Kumar, S. V. S., & Ramana Murthy, M. V. (2021). Experimental study on the deaeration process of low temperature thermal desalination plant. *Desalination and Water Treatment*, 222, 36–46. DOI: 10.5004/dwt.2021.27070

Bhatt, M., Singh, S. P., & Shrivastav, A. (2025). Impact characterization of salinity in seawater reverse osmosis brine and preference rankings of potential treatment technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), Article 119667. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119667

Broglioli, D., La Mantia, F., & Yip, N. Y. (2018). Thermodynamic analysis and energy efficiency of thermal desalination processes. *Desalination*, 428, 29–39. DOI: 10.1016/j.desal.2017.11.010

Cancilla, N., Culcasi, A., & Micale, G. (2024). Technologies for Desalination of Brackish and Sea Water. In: Minella, M., Bianco Prevot, A., Maurino, V. (Eds.), *Water Reuse and Unconventional Water Resources* (Lecture Notes in

Chemistry, vol 113), 319–366. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-67739-7_14

Chung, H., Jeong, H., Jeong, K. -W., & Choi, S. -H. (2016). Improved productivity of the MSF (multi-stage flashing) desalination plant by increasing the TBT (top brine temperature). *Energy*, 107, 683–692. DOI: 10.1016/j.energy.2016.04.028

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2024, agosto 2). *Más de 13 millones de usuarios sin acceso a agua*.

Dani, H., Gandhi, D., Shabiimam, M. A. (2024). Various membrane techniques for water treatment: A review. In: D. Patel, B. Kim, & D. Han (Eds.), *Innovation in smart and sustainable infrastructure, Volume 2*. (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 485). Springer, Singapur. DOI: 10.1007/978-981-97-3994-3_5

Dashputre, A., Kaushik, A., Pal, A., Jariwala, D., Yadav, K., & Shah, M. (2023). Geothermal energy integrated multi-effect evaporator (MEE) and multi-effect distillation (MED)-based desalination systems: an ecofriendly and sustainable solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 67941–67952. DOI: 10.1007/s11356-023-26858-w

Dilli, B., & Phani Kumar, S. V. S. (2024). Solar parallel feed multi effect distillation plant: An experimental study. *Desalination and Water Treatment*, 317, Article 100147. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100147

Dincer, I., & Temiz, M. (2024). Métodos de desalinización. En: *Opciones de energía renovable para la generación de energía y la desalinización*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-53437-9_6

Elfaqih, A. K., Elbaz, A. & Akash, Y. M. (2024). A review of solar photovoltaic-powered water desalination technologies. *Sustainable Water Resources Management*. 10, Article 123. DOI: 10.1007/s40899-024-01067-6

Elma, M., Rahma, A., Mustalifah, F. R., Rahman Wahid, A., Lamandau, D. R., Fatimah, S., Huda, M. S., Alsiren, M. A., Nasruddin, Saraswati, N. K. D. A.

- Simatupang, P. F. A., Firdaus, P. F. A., Abdurrahman. **(2023)**. Nanofiltration Technology Applied for Peat and Wetland Saline Water. In: Ahmad, A., Alshammari, M.B. (Eds.), *Nanofiltration Membrane for Water Purification*. (Sustainable Materials and Technology). DOI: 10.1007/978-981-19-5315-6_12
- Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. **(2013)**. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197–207. DOI: 10.1016/j.desal.2012.12.004
- Ghorbani, S., Deymi-Dashtebayaz, M., Yazdani, M., & Remiorz, L. **(2025)**. Thermo-economic and multi-objective optimization of a solar-powered MED-TVC desalination system considering ejector positioning and seasonal energy input. *Solar Energy*, 298, 113638. DOI: Grueso-10.1016/j.solener.2025.113638
- Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., Steffen, W., Glaser, G., Kanie, N., & Noble, I. **(2013)**. Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 495, 305–307. DOI: 10.1038/495305a
- Grueso-Domínguez, M., Castro-Jiménez, C., Correa-Ochoa, M., & Saldarriaga-Molina, J. **(2019)**. Estado del arte: Desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 69–89. DOI: 10.22395/rium.v18n35a5
- Haqiqi, M., Dussi, S., & Garcia-Navarro, J. **(2025)**. Multi-effect distillation for water desalination in an offshore PEM electrolyser system. *Energy Reports*, 14, 1452–1466. DOI: 10.1016/j.egy.2025.07.031
- Hoek, E. M. V., Weigand, T. M., & Edalat, A. **(2022)**. Reverse osmosis membrane biofouling: Causes, consequences and countermeasures. *npj Clean Water*, 5, 45. DOI: 10.1038/s41545-022-00183-0

- Huang, Y., Leslie-Keefe, C., & Leslie, G. **(2024)**. Desalination in the Pacific. In: Dansie, A., Alleway, H.K., Böer, B. (Eds.) *The Water, Energy, and Food Security Nexus in Asia and the Pacific* (Water Security in a New World). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-25463-5_8
- Jalili, A., & Kolliopoulos, G. **(2025)**. A review of fundamentals, challenges, prospects, and emerging trends in hydrate-based desalination. *npj Clean Water*, 8, 52. DOI: 10.1038/s41545-025-00484-0
- Janajreh, I., Zhang, H., El Kadi, K., & Ghaffour, N. **(2023)**. Freeze desalination: Current research development and future prospects. *Water Research*, 229, Article 119389. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119389
- Kacimi, Y., Cheknane, B., Hamid, A., & Said, N. **(2025)**. Feasibility and economic evaluation of a solar-powered multi-stage flash desalination system: A case study for Algeria. *Journal of Water Process Engineering*. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107398
- Liponi, A., Wieland, C., & Baccioli, A. **(2020)**. Multi-effect distillation plants for small-scale seawater desalination: Thermodynamic and economic improvement. *Energy Conversion and Management*, 205, Article 112337. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112337
- Mahmood, S., Mahmood, N., Liaquat, M. U., Ikhlaq, F., Shehzad, H., & Yao, S. **(2026)**. Electrodialysis for sustainable water desalination: Principles, applications, challenges, and future directions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14(2), Article 121466. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121466
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. **(2023)**. *Colombia, riqueza hídrica del mundo*.
- Ministerio de Igualdad y Equidad. **(2025)**. *Documento técnico de formulación de programas estratégicos: Agua es vida*.

Ministerio de Salud y Protección Social. **(2024)**. *Una mirada actual al contexto migratorio y sus determinantes sociales: La Guajira*.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. **(2017)**. *Resolución 0330 de 2017: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. **(s. f.)**. *Tecnologías de membrana: electrodiálisis*. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).

Montazeri, S. M., & Kolliopoulos, G. **(2022)**. A comprehensive review of freeze desalination methods for seawater desalination. *Desalination*, 540, 115855. DOI: 10.1016/j.desal.2022.115855

Mousavi Rabeti, S. A., Khoshgoftar Manesh, M. H., Blanco-Marigorta, A. M., & Del Río-Gamero, B. **(2026)**. Multi-objective optimization, techno-economic analysis, and life cycle assessment of an innovative solar-biomass-driven cogeneration system integrated with MED-RO-MD: A case study of the Canary Islands. *Renewable Energy*, 256(Part A), 123757. DOI: 10.1016/j.renene.2025.123757

Muthumeenal, A., Ihm, S., Hamed, O. A., Elmakki, T., Hyunwoong, P., Sanguk, L., Dong Suk, H. **(2026)**. Fuel efficiency and cost optimization in combined cycle power plant (CCPP)-integrated desalination systems: A comparative study of MSF, MED, and SWRO. *Desalination and Water Treatment*, 325, 101596. DOI: 10.1016/j.dwt.2025.101596

Nallakukkala, S., & Lal, B. **(2021)**. Seawater and produced water treatment via gas hydrate: Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105053. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105053

Oraby, H., Ezz, A. A. & Hegazy, G. E. **(2025)**. Advances in desalination: pioneering methods and the future of water sustainability. *Discover Water* 5, 88. DOI: 10.1007/s43832-025-00222-0

- Otaru, A. J., Baba, I. A., Awe, O. B., Auta, M., Khalil, S. F., & Khan, H. **(2026)**. Advanced graphene-based hybrid membranes for sustainable seawater desalination and multi-contaminant water treatment: A review. *FlatChem*, *57*, 101039. DOI: 10.1016/j.flatc.2026.101039
- Romo, S. A., Storch, M. J., & Srebric, J. **(2024)**. Operation modeling and comparison of actual multi-effect distillation and reverse osmosis desalination plants. *Desalination*, *571*, 117046. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117046
- Safarpour, M., Khataee, A., & Vatanpour, V. **(2015)**. Thin film nanocomposite reverse osmosis membrane modified by reduced graphene oxide/TiO₂ with improved desalination performance. *Journal of Membrane Science*, *489*, 43–54. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.04.010
- Saldivia, D., Rosales, C., Barraza, R., & Cornejo, L. **(2019)**. Computational analysis for a multi-effect distillation (MED) plant driven by solar energy in Chile. *Renewable Energy*, *132*, 206–220. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.139
- Santos, I. M., & de Souza, C.A.C. **(2024)**. Graphene oxide-based nanohybrids incorporated in nanofiltration and reverse osmosis membranes for desalination and dye separation: a review. *Frontiers of Materials Science*, *18*, 240700. DOI: 10.1007/s11706-024-0700-1
- Servicio de Evaluación Ambiental **(2023)**. *Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA* (1ª ed.). Gobierno de Chile.
- Shamet, O., & Antar, M. A. **(2023)**. Mechanical vapor compression desalination technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *187*, 113757. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113757
- Shatat, M., & Riffat, S. B. **(2014)**. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *9* (1), 1–19. DOI: 10.1093/ijlct/cts025

- Sun, L., Hassanpouryouzband, A., Liang, H., Dong, H., Zhang, L., & Song, Y. **(2025)**. Emerging potential unconventional applications of gas hydrate technologies in sustainable and environmental industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 222, 115987. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115987
- Suu, L., Lim, J., Choi, J.-S., & Choi, Y. **(2026)**. Mineral carbonation in seawater desalination brine: Review and future perspective. *Desalination, Article 120112*. DOI: 10.1016/j.desal.2026.120112
- Tareemi, A. A., & Sharshir, S. W. **(2023)**. A state-of-art overview of multi-stage flash desalination and water treatment: Principles, challenges, and heat recovery in hybrid systems. *Solar Energy*, 266, Article 112157. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112157
- Tarif, A., Kim, B. -J., Han, D. S. & Park, H. **(2025)**. Solar desalination: current technological status and future directions. *Advances in Industrial and Engineering Chemistry*, 1, 24. DOI: 10.1007/s44405-025-00027-8
- Tayel, A., Abdelaal, A. B., Esawi, A. M. K., & Ramadan, A. R. **(2023)**. Thin-film nanocomposite (TFN) membranes for water treatment applications: Characterization and performance. *Membranes*, 13(5), 477. DOI: 10.3390/membranes13050477
- Tiwary, S. K., Singh, M., Chavan, S. V., & Karim, A. **(2024)**. Graphene oxide-based membranes for water desalination and purification. *npj 2D Material and Applications*, 8, 27. DOI: 10.1038/s41699-024-00462-z
- Tucker, C. I., Bartholomew, T. V., Dudchenko, A. V., & Mauter, M. S. **(2024)**. Component innovations for lower cost mechanical vapor compression. *Water Research*, 260, 121950. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121950
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. **(2023)**. *Documento regional San Andrés y Providencia*.

- Van Vliet, M. T. H., Jones, E. R., Flörke, M., Franssen, W. H. P., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. R. **(2021)**. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, *16*(2), 024020. DOI: 10.1088/1748-9326/abbfc3
- Wang, P., Chen, H., & Ren, Q. **(2026)**. Electrodialysis seawater desalination rate prediction based on a convolutional attention network with global-inverted and local bottleneck structures. *Desalination*, *624*, 119904. DOI: 10.1016/j.desal.2026.119904
- Zhang, H., Chen, H., Wei, Q., Zhang, Z., Fang, M., Yang, J., Qi, F., Tao, H., Wang, R., & He, M. **(2025)**. Study on mechanical vapor compression regeneration performance and process optimization of MEA absorbent solution. *Thermal Science and Engineering Progress*, *66*, 104065. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.104065
- Zhao, T., Li, C., Han, A., Yuan, B., Wang, X., & Meng, X. **(2025)**. Desalinización del agua de mar mediante el método de congelación-deshielo basado en la teoría del funcional de la densidad. *Sci Rep* *16*, 1062. DOI: 10.1038/s41598-025-30668-0
- Zheng, J., Cheng, F., Li, Y., Lü, X., & Yang, M. **(2019)**. Progress and trends in hydrate-based desalination (HBD) technology: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *27*(9), 2037–2043. DOI: 10.1016/j.cjche.2019.02.017

Capítulo 3

Desarrollo económico y productivo en el caribe colombiano a partir del agua marina

Rafael Bolaño-Vásquez
Camila Pulido Rodríguez
Manuel D. Palencia-Bolaños

3.1. Agronomía marina

La agronomía marina puede entenderse como la ciencia y tecnología del manejo de cultivos en ambientes marinos, buscando que la producción sea sostenible, segura y eficiente con la menor degradación ambiental posible. En este sentido, los ecosistemas marinos, dada su vasta extensión, concentran una proporción significativa de la biodiversidad global, albergando aproximadamente la mitad de las especies conocidas a nivel mundial (Sekar et al., 2025). Esta diversidad biológica convierte a los ambientes marinos en entornos especialmente aptos para el desarrollo de actividades agrícolas marinas, como el cultivo de vegetales marinos, que constituyen la base de sistemas productivos integrados. Tales cultivos no solo contribuyen directamente a la producción de alimentos y biomasa de valor, sino que también sustentan cadenas productivas más amplias, incluida la producción secundaria de proteína de origen marino mediante acuicultura y pesca gestionada, fortaleciendo la seguridad alimentaria en comunidades costeras y generando oportunidades económicas complementarias como el turismo sostenible.

En este sentido, la relevancia de estos sistemas productivos se incrementa considerablemente si se considera que el crecimiento poblacional y la aceleración de los efectos del cambio climático han convertido el aseguramiento de una provisión alimentaria estable y sostenible en una prioridad global (Greenfeld et al., 2024). Asimismo, otros recursos marinos, como las algas, aportan biomateriales con alto valor funcional, capaces de mejorar la productividad de los sistemas de cultivo de peces y de otras especies acuáticas. Esto se debe tanto a su riqueza nutricional como a su capacidad de interactuar de manera sinérgica en la protección y optimización del recurso marino, tal como ocurre en los sistemas de Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA) (Uddin et al., 2025).

De manera complementaria, se han desarrollado enfoques productivos alternativos, entre los cuales destaca el policultivo, una técnica que consiste en la cría simultánea de distintas especies acuáticas que comparten procesos químicos y biológicos similares (Sasikumar & Viji, 2015; Shah et al., 2017). Esta modalidad se distingue del enfoque IMTA en que el policultivo se basa en especies pertenecientes a un mismo nivel trófico, mientras que la Acuicultura Multitrófica Integrada incorpora organismos de diferentes niveles tróficos, promoviendo así una mayor eficiencia ecológica del sistema (Shinde et al., 2024).

3.1.1. Acuicultura marina

La acuicultura se define como el cultivo de organismos acuáticos: peces, crustáceos, moluscos y plantas, en entornos seleccionados o controlados (Bouelet Ntsama et al., 2018; Iber et al., 2021; Ahmad et al., 2021) esta puede darse en agua dulce, como ríos y estanques controlados, o en agua salada, en entornos marítimos y en la cual se enfoca el presente estudio. Su productividad la ha posicionado como una de las industrias agroalimentarias de más rápido crecimiento en el mundo, que entre 2001 y 2018, aumentó en un promedio del 5,3 % anual, en paralelo con las demandas de la creciente población humana (FAO, 2020; Hlordzi et al., 2020). Para el año 2022, la producción de animales acuáticos alcanzó los 185 millones de toneladas entre cría de animales (51 %) y pesca de captura (49 %) que representó un aproximado de 452 mil millones de dólares (FAO, 2024). En Colombia, el aporte fue de 320.000 toneladas, demostrando una recuperación en la producción luego de su caída en el año 2017 (FAO, 2023).

El informe de la FAO (2024) menciona que el comercio de animales acuáticos ha experimentado un crecimiento del 7,2 % al año. También indica que las exportaciones alcanzaron los setenta millones de toneladas, representando un valor de 192 mil millones en el año 2022, lo que representó un 9,1 % del comercio agrícola total (FAO, 2024). Por último, el impacto social de la pesca y la acuicultura se manifiesta de manera clara en su capacidad para dinamizar el empleo y fortalecer la economía de las comunidades costeras. Estas actividades no solo generan ingresos directos, sino que además sostienen formas de vida tradicionales y contribuyen a la estabilidad social de territorios que, en muchos casos, cuentan con opciones productivas limitadas. De este modo, la participación de las familias locales en las cadenas de valor asociadas al aprovechamiento de los recursos marinos se convierte en un factor clave para el desarrollo regional y la reducción de la vulnerabilidad socioeconómica.

Tabla 3.1. Exportaciones de animales acuáticos.

Transacción	1990s	2000s	2010s	2020	2021	2022
Exportaciones en cantidad. *	39.3	51.2	60.8	63.8	67.8	70.0
% sobre producción total.	35.4	38.3	37.5	35.8	36.9	37.6
Exportaciones en USD. **	46.6	76.4	141.8	151.0	176.6	192.2

Nota: *millones de toneladas. **miles de millones de USD.

Asimismo, la diversidad de modalidades laborales presentes en el sector que incluyen trabajos permanentes, temporales y estacionales permite la inclusión de distintos perfiles ocupacionales, tanto en sistemas de producción a gran escala como en emprendimientos de carácter artesanal. Esta flexibilidad facilita la adaptación de las comunidades a las dinámicas del mercado y a las condiciones ambientales cambiantes.

En este contexto, para el año 2022 se estimó que alrededor de 62 millones de personas se encontraban vinculadas al sector primario de la pesca y la acuicultura, desempeñándose como trabajadores de tiempo completo, parcial u ocasional (FAO, 2024). Esta cifra evidencia la magnitud del aporte del sector al empleo global y resalta su relevancia como pilar económico y social en numerosas regiones costeras del mundo.

La acuicultura a gran escala genera efectos ambientales adversos, principalmente asociados a la descarga de efluentes provenientes de los sistemas productivos. A medida que esta actividad se intensifica, aumenta de forma paralela el uso de insumos como alimentos balanceados, fertilizantes y otros aditivos necesarios para sostener la producción (Ahmad et al., 2021). En consecuencia, dichos materiales, al no ser aprovechados en su totalidad, se transforman en residuos que elevan la carga orgánica y de nutrientes en las aguas circundantes. Este proceso puede alterar la calidad del agua y afectar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos, evidenciando la necesidad de implementar prácticas de manejo más sostenible. Estas aguas cuentan con un alto contenido de contaminantes fisicoquímicos y biológicos que pueden filtrarse al agua, representando una amenaza para la seguridad alimentaria y la salud humana.

Las sustancias contaminantes asociadas a estos procesos provienen de tres orígenes bien definidos. En primer lugar, el exceso de suministro de alimentos y fertilizantes utilizados para la nutrición de los peces, que representan una fuente importante de compuestos no asimilados. En segundo término, los procesos metabólicos propios de los organismos cultivados junto con la descomposición de individuos muertos generan desechos orgánicos adicionales. Finalmente, el uso de medicamentos y productos químicos durante las etapas productivas puede provocar su acumulación en el sistema, contribuyendo de manera directa a la contaminación del agua si no se gestionan adecuadamente (Ver **Figura 3.1.**) (Hlordzi et al., 2020). Liu et al. (2024) clasifica estos contaminantes en cuatro grupos: contaminantes convencionales, compuestos orgánicos, contaminantes biológicos y metales pesados (Ver **Figura 3.2.**).

Los contaminantes convencionales incluyen la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos disueltos totales (TDS), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (SST), el nitrógeno amoniacal total (TAN), el nitrógeno total (NT), el nitrito, el nitrato, entre otros (Ogunfowora et al., 2021), que provienen principalmente de la acción metabólica de los peces y del manejo de la alimentación en el cultivo. Por otra parte, los contaminantes orgánicos obtenidos de las actividades antropogénicas como los bifenilos policlorados (PCB), los microplásticos (MP), los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), pesticidas, antibióticos, entre otros, cuya contaminación no solo afecta la calidad

del agua, sino que también la salud de los organismos acuáticos (Ogunfowora et al., 2021).

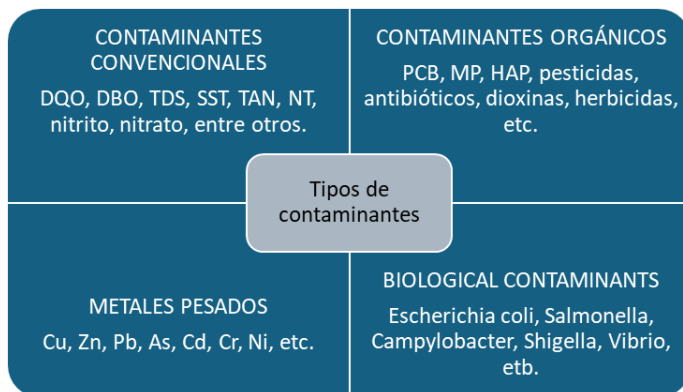
Figura 3.1. Contaminantes provenientes de la acuicultura.



También se consideran contaminantes los metales pesados que pueden encontrarse en pequeñas cantidades en los sistemas vivos, cuya presencia surge debido a la necesidad biológica de incorporarlos en procesos metabólicos esenciales. Elementos como el cobre, el hierro y el zinc cumplen funciones indispensables en el metabolismo de los peces (Liu et al., 2024), sin embargo, también se han encontrado materiales como el mercurio, cadmio, arsénico y plomo en estos sistemas, y de los cuales no se identifica su utilidad. Estos metales en exceso representan un riesgo para los ecosistemas, perjudicando a los peces y a otras formas de vida acuática (Ogunfowora et al., 2021). Estos elementos no se biodegradan y por el contrario, se acumulan en los tejidos de los peces, perjudicando a largo plazo la salud humana.

Finalmente, los contaminantes biológicos, compuestos por microorganismos que desprenden toxinas que provocan la propagación de enfermedades. Estudios demuestran la presencia de *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Campylobacter*, entre otros en sistemas de acuicultura y que, si bien no generan enfermedades en los peces, pueden generar infecciones a los seres humanos en el consumo (Ogunfowora et al., 2021).

Figura 3.2. Tipos de contaminantes.



En consecuencia, las principales afectaciones derivadas de la presencia de contaminantes en los sistemas acuícolas se reflejan tanto en la seguridad alimentaria como en la integridad ambiental. Desde la perspectiva de salud pública, la acumulación de contaminantes químicos y biológicos en los organismos cultivados incrementa el riesgo de infecciones y enfermedades transmitidas por los alimentos, comprometiendo la inocuidad de los productos destinados al consumo humano y, por ende, la seguridad alimentaria (Ahmad et al., 2021). En el ámbito ambiental, los efectos toxicológicos asociados a estos contaminantes pueden desencadenar procesos de eutrofización, favorecer el desarrollo de resistencia bacteriana y contribuir a la degradación de los ecosistemas acuáticos y de los suelos adyacentes afectando la sostenibilidad de la actividad acuícola a largo plazo.

Como respuesta a estos desafíos, se han desarrollado sistemas integrados como la IMTA, que buscan mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental de los cultivos marinos. La IMTA se basa en la integración de especies pertenecientes a distintos niveles tróficos, de modo que los residuos generados por una especie son aprovechados como alimento, fertilizante o fuente de energía por otras especies cultivadas (Neori et al., 2004; Troell et al., 2003; Chopin et al., 2008).

Este enfoque sinérgico permite no solo mejorar la eficiencia del uso de los recursos, sino también optimizar la calidad del agua y del entorno productivo, contribuyendo a la protección del medio ambiente (Chang et al., 2020; Knowler et al., 2020). Además, para los acuicultores, la adopción de sistemas IMTA puede traducirse en una mayor rentabilidad económica y social, al reducir costos asociados al tratamiento de efluentes y a la alimentación, al tiempo que se incrementa la calidad y diversidad de los productos obtenidos (Uddin et al., 2025). Este modelo ha sido aplicado con éxito en zonas costeras y en sistemas offshore, integrando, por ejemplo, cultivos de salmón con especies extractivas como macroalgas (kelp) y mejillones, que aprovechan los nutrientes residuales y generan valor agregado, mitigando el impacto ambiental de la producción (Chopin, 2008).

Dicho esto, se entiende que la acuicultura marina constituye un sector altamente productivo y estratégico para el suministro de alimentos, el comercio internacional y el desarrollo socioeconómico de las comunidades costeras. Sin embargo, su sostenibilidad depende de la adopción de enfoques de manejo integrados y ambientalmente responsables que permitan minimizar los impactos asociados al cultivo y garantizar la estabilidad de los recursos marinos a largo plazo.

3.1.2. Cultivos de plantas con riego de agua de mar

La agricultura representa alrededor del 70 % del uso de agua dulce, aumentando su demanda continuamente (Gleick & Cooley, 2021), la presión generada sobre los sistemas hídricos, que no sólo abastecen al sector agrícola sino a la vida humana en general hace que se genere escasez del recurso, impulsando a la búsqueda de nuevas fuentes de agua para riego. Esta situación se torna mucho más compleja en regiones costeras, cuyos suelos tienen un elevado nivel de salinidad y donde existe abundante agua de mar, lo que indica una escasez crónica de agua dulce lista para riego (Li et al., 2025). Este desequilibrio representa una amenaza a la productividad de los cultivos y la seguridad alimentaria regional.

La escasez de agua, junto con la salinización del suelo, constituyen dos importantes desafíos para la producción agrícola, que con el cambio climático han agravado su situación, especialmente en las regiones marginales (Hassani et al., 2021). El desarrollo agrícola se encuentra estrechamente relacionado con la

seguridad alimentaria, por lo que la disposición de los recursos hídricos disponibles es de suma importancia para impulsar la producción agrícola.

El agua de mar representa un entorno iónico que puede llegar a ser equilibrado para los cultivos. Además de su contenido de cloruro de sodio y de magnesio, que es de un 75 % y un 10 % respectivamente (Atozori et al., 2019), el recurso cuenta con otros elementos que son nutritivos para las plantas, además de oligoelementos y microorganismos necesarios (Boyko & Boyko, 1966; Eyster, 1968).

Sin embargo, la elevada salinidad del agua de mar genera altos valores de conductividad eléctrica, un parámetro ampliamente utilizado para describir la calidad del agua de riego. A medida que aumenta la conductividad eléctrica, disminuye la disponibilidad de agua para las plantas ya que el medio radicular presenta mayor dificultad para absorber agua. El efecto, conocido como estrés osmótico, constituye una de las principales limitaciones del uso de agua de mar en la agricultura, especialmente para especies no adaptadas a condiciones salinas (Ayers & Wesctcot, 1985; Munns & Tester, 2008).

A nivel general, la degradación causada por el estrés salino causa pérdidas sustanciales en la productividad agrícola, particularmente en áreas áridas y semiáridas (Balasubramaniam et al., 2023). El estrés osmótico que genera la sal comienza desde el primer contacto entre esta y la tierra, disminuyendo el potencial hídrico alrededor de la zona radicular y la conductividad del agua, obstaculizando el crecimiento vegetal (Munns, 2005). La acumulación de iones tóxicos como Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} inducen toxicidad iónica e impiden la absorción de nutrientes, lo que afecta las células y los tejidos vegetales (Isayenkov, 2019).

Las consecuencias de la acción de la sal en las plantas se evidencian en la morfología de la planta, retrasando el crecimiento y disminuyendo la eficiencia en la germinación de semillas; en la fisiología, limitando la fotosíntesis y la obtención de nutrientes; y a nivel bioquímico, ocasionando estrés oxidativo, fuga de electrolitos y desorganización de la membrana (Ji et al., 2022; Hannachi et al., 2022), lo que a largo plazo tiene efectos mucho más complejos durante la etapa reproductiva. Otro de los efectos que los estudios han evidenciado respecto al estrés salino en las plantas es la disminución del contenido de clorofila, el cual se

origina por el aumento de la oxidación y la degradación de ésta de forma proporcional al nivel de salinidad (Taïbi et al., 2016; Wang et al., 2013).

Estudios realizados en especies de plantas como la berenjena (*Solanum melongena*); la verdolaga (*Portulaca oleracea*), variante de las plantas conocidas como suculentas; el arroz (*Oryza sativa*) y el piñón de tempate (*Jatropha curcas*) permitieron llegar a la misma conclusión: el estrés salino conduce a tasas fotosintéticas reducidas cuando la concentración de sal es baja, y daña las estructuras del cloroplasto cuando la concentración de sal es media a alta (Hannachi et al., 2022; Hnilickova et al., 2021; Wang et al., 2018; Silva et al., 2011). Cultivos de alto rendimiento como el trigo, el arroz y el maíz, principales cereales primarios que cubren el 29 % de la producción agrícola mundial, son altamente sensibles a la sal (Bazihizina et al., 2024).

La marcada variabilidad en la respuesta de las plantas al estrés salino, evidenciada tanto en la reducción de la fotosíntesis como en el daño estructural a nivel celular, pone de manifiesto que la sensibilidad a la salinidad no es uniforme entre las especies vegetales. En este contexto, estas pueden clasificarse, de manera general, en glicófitas, que son aquellas sensibles a condiciones de alta salinidad y a la cual pertenecen la mayoría de las plantas que se cultivan en el mundo; y halófitas, cuya sensibilidad a la sal es mucho menor, por el contrario, requieren de la sal para su crecimiento (Grigore & Toma, 2017). Su tolerancia a la sal puede alcanzar umbrales que van desde una concentración de 50 mM (milimoles) hasta 500 mM de NaCl, que corresponde a un aproximado de la concentración salina en el agua de mar (Sharma & Gupta, 1986).

Desde la antigüedad, las plantas halófitas se han recolectado como alimento por sus propiedades medicinales, además de su contenido en sal (Davy et al., 2001; Lieth, 2000). Sus aplicaciones son diversas no solo para aumentar el rendimiento de los cultivos tradicionales que se ven afectados por la salinidad del suelo, sino que también han evidenciado aplicaciones en el sector alimenticio, la producción de forrajes o producción de bioenergía, ya que el aceite extraído de sus semillas y la biomasa lignocelulósica presentan un alto potencial para la producción de biocombustibles (Panta et al., 2014). Algunas de estas aplicaciones pueden ser altamente rentables, beneficiando a las comunidades afectadas por la problemática

y mejorando su producción agrícola gracias a la halo-fitorremediación en el que se hace la intercalación o rotación con las plantas, restaurando así los suelos salinos (Ben Hamed et al., 2021). Un ejemplo de esto es la *Arthrocaulon macrostachyum*, cuyo cultivo permite la reducción de la salinidad del suelo en un 30 % en 30 días (Jurado Mañogil et al., 2023), y que al ser cocultivada con cebada, trigo y tomate, reduce los efectos negativos de la sal en el crecimiento del cultivo (Barcia Piedras, et al., 2019).

El consumo humano se remonta a siglos en todo el mundo, en halófitas como la *Salicornia*, cuya funcionalidad se da gracias a que es rica en fibra dietética, minerales, vitaminas, entre otros que le permiten su uso para consumo (Coc-Coj et al., 2020). Estas plantas han alcanzado un total de 1560 especies clasificadas, de las cuales 115 han sido evaluadas como alimentarias y 331 como forraje en varias regiones, quedando un restante de 1114 especies por determinar (Panta et al., 2014; Ventura et al., 2015; Rozema & Flowers, 2008). La base de datos eHaloph aloja la mayoría de la información importante sobre estas halófitas de forma interactiva.

En cuanto al riego y aprovechamiento del agua en el cultivo, en la actualidad, se han explorado tecnologías para la mejora de la calidad del agua y su aprovechamiento en el sector agrícola, sobre todo en territorios costeros donde existe abundancia de agua salina. Diversos métodos como su dilución o procesamiento para hacer el recurso apto para el riego, o la aplicación de esta agua con apoyo de materiales que neutralicen sus efectos han presentado resultados positivos en el desarrollo de los cultivos.

Ge et al. (2025) presenta un estudio en el que integra el agua dulce y salada mediante procesos fisicoquímicos, mejorando así la eficiencia de los sistemas de riego. Esto permite un aprovechamiento del riego con agua salina y mitiga la salinización del suelo, otorgando protección ecológica y dando respuesta a la crisis por escasez de agua, promoviendo un desarrollo agrícola sostenible.

Otra estrategia aplicable al riego con agua de mar es el riego deficitario (DEI), donde se aplica menos agua de la necesaria únicamente en momentos clave del crecimiento de la planta (Lu et al., 2025), permitiendo que esta absorba los

nutrientes del agua para su crecimiento. El suministro no debe realizarse de forma directa, sino que esta debe ser diluida o tratada, y permite suprimir la salinización secundaria en terrenos salinos dando respuesta a la problemática de escasez de agua en el mundo (Kang et al., 2002; Yuan et al., 2019).

La reducción en el volumen de agua de riego que presenta el DEI minimiza los efectos adversos del rendimiento, permitiendo que el cultivo se autorregule fisiológicamente (Du et al., 2023; Kang et al., 2012; Kirda, 2002). Estudios encontraron que el método ha inducido a regulaciones fisiológicas de las plantas como la producción de ácido abscísico, regulador del crecimiento y de la respuesta de las plantas al estrés, promoviendo el desarrollo de raíces primarias y laterales que contribuyen a la absorción de nutrientes (Du et al., 2015; Rao et al., 2016).

Ahora bien, para mitigar el impacto del exceso de salinidad en la tierra, se han empleado otras estrategias como el uso de biocarbón y biofertilizantes. El biocarbón, gracias a sus abundantes grupos funcionales, contenido de carbono y estructura porosa, que mejoran la estabilidad de la materia orgánica del suelo frente a la degradación causada por la desalinización (Dai et al.), mejorando así las reservas de carbono en el suelo. Es apropiado aplicar esta estrategia en casos donde la DEI afecta de forma negativa las respuestas morfofisicobioquímicas en plantas cultivadas en suelos salinos, puesto que mejora las propiedades de estos y el estrés hídrico y salino (Shaaban et al., 2024).

Por otra parte, el uso de fertilizantes bioorgánicos permiten reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mejoran significativamente la fertilidad del suelo (Polthanee et al., 2015; Qaswar et al., 2020). Su capacidad trasciende hacia la mejora de las propiedades físicas y químicas de los suelos salino-alcinos, mejorando su fertilidad y el rendimiento del cultivo. El estudio de Xia et al. (2025) evidencia que la salinidad del suelo luego de la aplicación de estos fertilizantes al 60 %, se redujo en un 54,86 %.

Por ende, es posible hacer uso del agua de mar para la producción agrícola, sin embargo, es necesario efectuar procesos que mitiguen el impacto que genera la salinidad del agua en el suelo, aprovechando en la medida justa todos los minerales que esta ofrece para el cultivo.

La productividad y la calidad de los cultivos irrigados con agua de mar o sus derivados, dependen en gran medida de la interacción entre la calidad de agua de riego, el manejo agronómico y la tolerancia específica de cada cultivo a la salinidad. Las condiciones controladas mencionadas anteriormente, y una adecuada gestión de nutrientes, permite mantener niveles productivos competitivos en determinados cultivos agrícolas.

Imbernón-Mulero et al. (2025) evaluaron esta premisa en un cultivo de lechuga iceberg. Se empleó el riego con agua de mar salinizada en diferentes etapas del cultivo. Como resultados, se evidenció la ausencia de efectos adversos sobre el crecimiento o el desarrollo del cultivo, sobre todo apoyado en el manejo adecuado de los nutrientes.

En otros cultivos de alto valor como el tomate se evidencia una mayor sensibilidad al estrés salino, que si bien, pueden mejorar algunas características como la firmeza de la fruta, la salinidad en concentraciones más altas puede reducir significativamente el crecimiento vegetativo y el rendimiento (Mahmoudi et al., 2024). Por esta razón, aplicar estrategias de manejo eficiente del riego es importante, suministrando el volumen apropiado en el momento correcto.

Por esto, existen alternativas como el cultivo de halófitas, cuyo rendimiento es mayor al emplearse el agua de mar, tienen menores costos de producción y tienen alternativas productivas, ya que pueden ser transformadas en alimento, aceites vegetales, concentrados o medicinas (Lu et al., 2024).

La viabilidad técnica y económica del uso de agua de mar en sistemas agrícolas depende de la relación entre los costos de producción y las mejoras en el rendimiento y la rentabilidad del cultivo. Un estudio realizado por Martínez-Granados et al. (2022) detalla la rentabilidad económica del riego con agua de mar en la producción de tomate, considerando sistemas tradicionales en suelo como sistemas de cultivo sin suelo, también conocido como hidroponía.

Sin embargo, el uso de agua de mar en la agricultura incrementa los costos notablemente debido a varios factores. En primer lugar, el proceso de tratamiento

que se requiere para desalinizar y que sea apta para el riego genera un costo adicional generado por las plantas de tratamiento y transporte, incrementando el costo total de producción en un 5 % en sistemas sin suelo y 3 % en sistemas en suelo (Martínez-Granados et al., 2022). Como consecuencia, los costos de fertilización aumentan, puesto que el agua de mar desalinizada (DSW) presenta deficiencias en nutrientes esenciales, obligando a los productores a cubrir carencias nutricionales. Martínez-Granados et al. (2022) encontraron que la fertilización aumentó en un 20 % en sistemas sin suelo y en un 34 % en sistemas en suelo irrigados con DSW, en comparación con tratamientos realizados con agua de menor calidad.

También se evidenció un rendimiento mayor en los cultivos al usar la DSW en lugar de agua salobre. La menor salinidad del agua de riego incrementó los rendimientos promedio en un 15 % en cultivo tradicional en suelo y un 46 % en cultivo sin suelo, facilitando la escalabilidad económica del uso de DSW dado que el incremento de la productividad compensa el incremento en los costos operativos.

Por ende, el aprovechamiento del agua de mar es una alternativa viable técnica y económicamente para el uso en la agricultura, sobre todo en comunidades costeras. Si bien requiere de procesos adicionales para garantizar su eficiencia, como el cocultivo o la fertilización adicional, permite el aprovechamiento de un recurso ampliamente disponible.

3.1.3. Investigación y desarrollo en el caribe colombiano asociado con la agronomía marina

El Caribe colombiano constituye una región estratégica para el desarrollo de investigación y desarrollo (I+D) asociados con la agronomía marina, debido a la magnitud y características del espacio marítimo nacional, así como de la presencia de instituciones científicas y académicas con trayectoria en el estudio de los ecosistemas marinos, costeros y productivos. De acuerdo con la Sociedad Geográfica de Colombia, se establece que el país posee 658.000 km² en el Océano Atlántico y 330.000 km² en el Pacífico, para un área marítima total de 988.000 km², representando un aproximado del 44,86 % del territorio nacional, evidenciando la importancia geoestratégica del país en términos marinos y oceánicos, con

susceptibilidad a incrementarse conforme a lo establecido en los acuerdos y tratados internacionales vigentes (Comisión Colombiana del Océano, s.f.). Esta amplia extensión marina constituye una plataforma de gran valor para la investigación científica y el desarrollo de nuevas alternativas productivas basadas en el aprovechamiento sostenible de los recursos marinos y costeros.

Desde el punto de vista administrativo y territorial, Colombia presenta una configuración costera diversa que incide directamente en las dinámicas de investigación y desarrollo en agronomía marina. En el litoral caribe, el país cuenta con ocho departamentos con acceso directo al mar: La Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia y Chocó. Esta distribución territorial evidencia una alta concentración de poblaciones y actividades económicas en zonas costeras donde las interacciones entre sistemas terrestres y marinos generan escenarios propicios para el desarrollo de la agronomía marina como enfoque integrador.

En este contexto, la investigación y el desarrollo en el Caribe colombiano han sido impulsados por diversas instituciones científicas y académicas que, si bien no siempre abordan explícitamente la agronomía marina como disciplina, desarrollan líneas de trabajo estrechamente relacionadas con sus fundamentos. El Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) es una entidad adscrita al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y reconocida como centro de investigación en ciencias del mar. El INVEMAR desarrolla proyectos de investigación básica y aplicada orientados al conocimiento de los ecosistemas marinos y costeros, la biodiversidad, la calidad ambiental y la gestión sostenible de los recursos marinos.

Los proyectos ejecutados por el INVEMAR aportan información científica fundamental para la comprensión de los sistemas marinos y costeros del Caribe colombiano, lo cual resulta clave para cualquier iniciativa de agronomía marina. El conocimiento sobre la dinámica de los ecosistemas, la disponibilidad y la calidad de agua marina, así como las interacciones entre factores físicos, químicos y biológicos, constituye una base indispensable para evaluar la viabilidad de sistemas productivos que integren el uso de agua de mar o de ambientes costeros con fines agrícolas o agro productivos.

De manera complementaria, la investigación agropecuaria en la región Caribe ha sido fortalecida por el Centro de Investigación Caribia establecido por AGROSAVIA, el cual se consolida como un polo de desarrollo agrícola para la región. Este centro se caracteriza por su enfoque de investigación básica aplicada orientada a productos prioritarios para la seguridad alimentaria y los sistemas productivos, de pequeños y medianos productores. Sus líneas de trabajo incluyen cultivos como maíz, yuca, plátano y cítricos, los cuales son fundamentales para la economía agrícola regional.

Aunque el Centro de Investigación Caribia se enfoca principalmente en agricultura convencional, sus resultados y capacidades científicas representan un insumo relevante para la investigación en agronomía marina, especialmente en lo relacionado con la adaptación de sistemas productivos a condiciones ambientales adversas. La experiencia acumulada en el manejo de cultivos bajo condiciones de estrés, la generación de tecnologías apropiadas para pequeños y medianos productores y el enfoque territorial del centro constituyen elementos que pueden ser articulados con iniciativas de agronomía marina en zonas costeras del Caribe colombiano.

Asimismo, el ámbito académico ha contribuido de manera significativa al desarrollo del conocimiento científico relacionado con los ambientes acuáticos y marinos en la región. Un ejemplo destacado es el grupo de Hidrobiología de la Universidad de Cartagena, creado en 2010, el cual ha orientado sus esfuerzos a complementar el inventario de la biota presente en cuerpos de agua dulce y marina del país, con especial énfasis en los departamentos costeros del Caribe colombiano. Este grupo desarrolla investigaciones sobre especies de interés científico que presentan vacíos de información, potencial de aprovechamiento, grados de amenaza, riesgo de bioinvasión o un alto nivel de desconocimiento.

Adicionalmente, el grupo de Hidrobiología estudia la dinámica espacial y temporal de los diferentes niveles de organización ecológica, desde genes hasta biomas, presentes en las zonas geográficas costeras y marinas del Caribe colombiano. Este tipo de investigaciones resulta altamente pertinente para la agronomía marina, en la medida en que permite comprender los procesos ecológicos que sustentan la

productividad biológica de los ecosistemas marinos y costeros, así como identificar especies con potencial de aprovechamiento productivo bajo esquemas sostenibles.

Las actividades de investigación desarrolladas por estas instituciones evidencian que el Caribe colombiano cuenta con una base científica sólida para el avance de la agronomía marina, aun cuando no se encuentra plenamente consolidada como línea de investigación específica. La amplia extensión del territorio marítimo nacional y la diversidad de los departamentos y municipios costeros y la existencia de zonas especiales de investigación y explotación común crean un escenario favorable para el fortalecimiento de programas de I+D orientados al uso sostenible del mar y sus recursos con fines agronómicos.

Sin embargo, se requiere una mayor articulación entre las instituciones de investigación marina, los centros de investigación agropecuaria y las universidades, con el fin de integrar conocimientos y capacidades. La convergencia entre la investigación en ciencias del mar, la producción agrícola y la gestión del territorio costero permitiría avanzar hacia modelos productivos innovadores que respondan a los desafíos ambientales y socioeconómicos de la región.

3.2. Desafíos agronómicos marinos

El desarrollo de la agronomía en territorios costeros se enfrenta a una serie de desafíos técnicos, biológicos, ambientales y económicos derivados principalmente del uso de agua de mar o agua salobre, así como de la integración de sistemas agrícolas y acuícolas en ambientes costeros. Si bien estos enfoques ofrecen oportunidades para diversificar la producción de alimentos, optimizar el uso de recursos hídricos y responder a escenarios de escasez de agua dulce, su implementación requiere un manejo cuidadoso de variables críticas como la salinidad, la selección de especies, la calidad del suelo y del agua, y el control de impactos ambientales.

Adicionalmente, la intensificación de actividades productivas en zonas marinas y costeras plantea retos asociados a la sostenibilidad ecológica, la seguridad alimentaria y la viabilidad económica de los sistemas productivos, especialmente en contextos de alta sensibilidad ambiental. En este marco, el presente apartado

analiza los principales desafíos agronómicos marinos identificados a partir de la literatura científica reciente, abordando las limitaciones fisiológicas de los cultivos, los riesgos ambientales de los sistemas acuícolas, las restricciones tecnológicas en el manejo del agua de mar y los condicionantes económicos que influyen en la adopción de estos modelos productivos.

3.2.1. Desafíos asociados a la salinidad y al estrés osmótico

El manejo del estrés salino derivado del uso del agua de mar o agua salobre en sistemas productivos agrícolas es uno de los principales desafíos del desarrollo de la agronomía marina. El estrés osmótico tiene consecuencias directas sobre la productividad agrícola, particularmente en regiones áridas y semiáridas, donde la salinización del suelo se ve intensificada por el cambio climático y la escasez de agua dulce (Hassani et al., 2021; Balasubramaniam et al., 2023). Desde el punto de vista fisiológico, la acumulación de iones tóxicos como Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} provoca toxicidad iónica, interfiere con la absorción de nutrientes esenciales y afecta la integridad celular de los tejidos vegetales (Isayenkov, 2019).

Estas alteraciones se manifiestan en reducciones del crecimiento, disminución de la fotosíntesis, alteraciones morfológicas y bioquímicas, y daños estructurales a nivel del cloroplasto, particularmente en cultivos sensibles a la salinidad como trigo, arroz y maíz, que representan una proporción significativa de la producción agrícola mundial (Bazihizina et al., 2024; Hannachi et al., 2022).

3.2.2. Limitaciones biológicas y selección de especies

En la agricultura, se debe tener en cuenta el entorno en el que se va a producir para identificar el producto adecuado. Dicho esto, la variabilidad en la tolerancia de las especies vegetales a la salinidad se posiciona como el segundo desafío presente en la agronomía marina, ya que la mayoría de los cultivos agrícolas tradicionales corresponden a glicófitas, que son plantas altamente sensibles a concentraciones elevadas de sal, lo que restringe su uso en sistemas de riego con agua de mar o suelos salinos (Bazihizina, 2024).

En contraste, las plantas halófitas presentan mecanismos adaptativos que les permiten tolerar concentraciones salinas que oscilan entre 50 mM y 500 Mm de NaCl, valores cercanos a la salinidad del agua de mar (Bazihizina, 2025). Sin embargo, el desafío radica en que, a pesar de su alto potencial productivo, solo una fracción limitada de las aproximadamente 1.560 especies halófitas clasificadas ha sido evaluada con fines alimentarios o forrajeros, existiendo un amplio número de especies aún sin caracterización productiva (Panta et al., 2014; Rozema & Flowers, 2008).

Esto evidencia ampliar la investigación orientada a la selección, domesticación y escalamiento de cultivos halófitos, así como su integración en sistemas agrícolas y agroindustriales viables, especialmente en comunidades costeras.

3.2.3. Impactos ambientales y seguridad alimentaria en sistemas acuícolas

La intensificación de la acuicultura marina, componente clave de los sistemas productivos asociados a la agronomía marina, plantea importantes desafíos ambientales. El incremento en el uso de alimentos balanceados, fertilizantes, medicamentos y aditivos genera una mayor descarga de efluentes con alta carga orgánica y de nutrientes, afectando la calidad de agua y el equilibrio de los ecosistemas marinos (Ahmad et al., 2021; Hlordzi et al., 2020).

Estos efluentes contienen contaminantes convencionales, compuestos orgánicos, metales pesados y contaminantes biológicos, los cuales pueden bioacumularse en los organismos cultivados y representar riesgos para la salud humana y la seguridad alimentaria (Liu et al., 2024; Ogunfowora et al., 2021). La presencia de microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella* y *Campylobacter* en sistemas acuícolas refuerza la necesidad de implementar prácticas de manejo más estrictas y sostenibles (Ogunfowora et al., 2021).

Desde una perspectiva agronómica marina, este escenario plantea el desafío de integrar la producción acuícola con sistemas que permitan la reutilización de residuos y la reducción de impactos ambientales, garantizando la inocuidad de los productos y la sostenibilidad a largo plazo.

3.2.4. Gestión del agua y tecnologías de riego con agua de mar

El uso de agua de mar en la agricultura representa un desafío técnico significativo debido a su alta salinidad, a pesar de su contenido en nutrientes y oligoelementos potencialmente beneficiosos para las plantas (Atozori et al., 2019; Boyko & Boyko, 1966). Para mitigar los efectos negativos del riego con agua salina, se han desarrollado estrategias como la dilución, el DEI y la integración fisicoquímica de agua dulce y salada (Ge et al., 2025; Lu et al., 2025).

Sin embargo, hacer uso de estas tecnologías requieren un manejo preciso del riego y del momento fenológico del cultivo, duplicando los esfuerzos de la producción, implementando las capacidades técnicas y el monitoreo constante representando un desafío adicional, y de importancia puesto que una aplicación inadecuada puede intensificar la salinización del suelo y afectar negativamente el rendimiento agrícola (Kang et al., 2002; Yuan et al., 2019).

3.2.5. Costos económicos y viabilidad productiva

Desde el punto de vista económico, el uso de agua de mar o agua desalinizada en sistemas agrícolas implica costos adicionales asociados al tratamiento, transporte y manejo del recurso hídrico. Estudios han demostrado que el uso de agua de mar desalinizada incrementa los costos de producción entre un 3 y un 5 %, además de aumentar los requerimientos de fertilización debido a deficiencias nutricionales del agua tratada (Martínez-Granados et al., 2022). Si bien se han registrado incrementos en el rendimiento agrícola al utilizar agua desalinizada frente a agua salobre, especialmente en sistemas sin suelo, la rentabilidad de estos sistemas depende del equilibrio entre el aumento de la productividad y los costos operativos adicionales (Martínez-Granados et al., 2022). Este aspecto constituye un desafío clave para la adopción de la agronomía marina a gran escala, especialmente en contextos de limitaciones económicas.

3.3. Proyectos de desalinización en la costa caribe colombiana

La región Caribe colombiana enfrenta un escenario creciente de estrés hídrico estructural, producto de la variabilidad climática, el aumento de la temperatura

media, la irregularidad en los regímenes de precipitación, la sobreexplotación de acuíferos costeros y el incremento sostenido de la demanda de agua por crecimiento poblacional, turismo, agricultura e industria. En este contexto, la desalinización de agua de mar ha emergido como una alternativa estratégica para garantizar el abastecimiento de agua potable y productiva, particularmente en territorios costeros e insulares donde las fuentes de agua dulce son limitadas o vulnerable a procesos de salinización.

En países como Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Qatar, Kuwait, España, Estados Unidos, Japón y China han consolidado la desalinización como un componente estructural de su seguridad hídrica, integrándola con energías renovables y sistemas de alta eficiencia (Imitola González et al., 2019). En Colombia, aunque la desalinización aún no se encuentra masificada, la región caribe se ha convertido en el principal laboratorio natural y tecnológico para su desarrollo, impulsada por proyectos de investigación, iniciativas gubernamentales y alianzas interinstitucionales orientadas a enfrentar la escasez de agua.

3.3.1. Investigación científica y desarrollo tecnológico en desalinización

La academia ha utilizado su potencial investigativo para desarrollar tecnologías que aporten a las comunidades. La Universidad del Norte, en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia y en el marco de la Convocatoria 852 del Ministerio de Ciencias presentaron el proyecto titulado “Desalinización de agua de mar acoplada a energía de gradiente salino, como una estrategia para aumentar la eficiencia energética y la disponibilidad de agua potable en zonas de alto estrés hídrico en el Caribe colombiano”, que plantea un enfoque innovador, integrando no solo la desalinización que potabiliza el agua, sino también la generación de energía renovable (Universidad Nacional de Colombia, 2025).

El proyecto se estructura en tres pilares fundamentales: el primero corresponde al diseño y construcción de una planta piloto capaz de generar aproximadamente 150 vatios mediante el aprovechamiento de la energía de gradiente salino, una fuente renovable basada en la diferencia de concentración de sales entre el agua de mar y el agua dulce. El segundo pilar integra este sistema energético con procesos de desalinización, buscando reducir los costos operativos asociados al elevado

consumo energético que tradicionalmente caracteriza a estas tecnologías. El tercer componente evalúa el impacto ambiental del sistema para garantizar su sostenibilidad y minimizar efectos negativos sobre los ecosistemas marinos y costeros.

Este enfoque resulta particularmente relevante para la agronomía marina, ya que no solo incrementa la disponibilidad de agua potable, sino que abre la posibilidad de suministrar agua desalinizada para usos agrícolas, acuícolas y agroindustriales, reduciendo la presión sobre fuentes continentales y acuíferos costeros.

3.3.2. Proyectos estratégicos de desalinización para abastecimiento urbano: el caso de Santa Marta

En el ámbito de la política pública, uno de los proyectos más ambiciosos de desalinización en la región Caribe corresponde a la construcción de dos plantas desalinizadoras para la ciudad de Santa Marta. Este proyecto fue declarado estratégico para la Nación mediante el CONPES 4159 de 2025, aprobado por el Departamento Nacional de Planeación, dada la crítica situación de abastecimiento hídrico que enfrenta la ciudad y su área metropolitana (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2025).

El Gobierno Nacional asignó una inversión de aproximadamente 786.000 millones de pesos colombianos, destinados para la compra, instalación y operación de las plantas desalinizadoras, y cuya gestión estará a cargo de la Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Santa Marta. Estas infraestructuras buscan garantizar el suministro continuo de agua potable, reduciendo la dependencia de fuentes superficiales altamente vulnerables a sequías prolongadas y eventos climáticos extremos.

Desde una perspectiva técnica, este proyecto representa un logro importante en la adopción de la desalinización a gran escala en Colombia y constituye una referencia clave para evaluar la viabilidad económica, ambiental y social de este tipo de soluciones en contextos urbanos costeros. Asimismo, abre oportunidades para el uso complementario del agua desalinizada en actividades agrícolas y sistemas productivos relacionados con la agronomía marina.

3.3.3. Desalinización y sostenibilidad hídrica en territorios insulares: San Andrés, Providencia y Santa Catalina

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina enfrenta condiciones complejas en cuanto a la gestión hídrica, debido a su ubicación insular, la limitada capacidad de recarga de sus acuíferos y la alta presión derivada del turismo y el crecimiento de la población. Ante esta situación, la desalinización se ha consolidado como una estrategia prioritaria para garantizar el abastecimiento sostenible de agua potable.

La Corporación Ambiental CORALINA, en conjunto con el Centro de Excelencia en Ciencias Marinas-CEMarin, orientado a la investigación marítima, han impulsado un proyecto innovador que integra la desalinización del agua de mar con el monitoreo de variables ambientales, con el fin de minimizar impactos ecológicos y optimizar el uso del recurso (Coralina, 2023). El proyecto no sólo busca asegurar el suministro de agua potable, sino que también explorar el aprovechamiento del agua de mar para producir alternativas de energía mediante sistemas acoplados a la desalinización.

En San Andrés resulta particularmente relevante para la agronomía marina, ya que permite evaluar modelos de desalinización a pequeña y mediana escala, adaptados a territorios frágiles, con alta biodiversidad y fuertes restricciones ambientales.

3.3.4. Diseño de plantas desalinizadoras para contextos rurales y semiáridos: caso La Guajira

La península de La Guajira constituye uno de los territorios con mayor vulnerabilidad hídrica en Colombia, caracterizado por condiciones semiáridas, alta evaporación y limitada disponibilidad de agua dulce. Imitola et al. (2019) desarrollaron el diseño de una planta desalinizadora de agua de mar para la zona de la media-alta Guajira, específicamente en el municipio de Manaure.

El diseño propuesto contempla una planta con capacidad para abastecer a más de 160.000 personas, con un caudal de diseño de 20.300 m³/día y un caudal de aporte de 45.000 m³/día, garantizando un consumo mensual per cápita de

aproximadamente 3,75 m³. La planta se enfoca en la captación y producción de agua potable, dejando abiertas alternativas para la distribución del recurso y la gestión de la salmuera resultante.

La descarga de la salmuera se realizaría en las salinas de Manaure, un lago de gran atractivo turístico, integrando la desalinización con actividades productivas tradicionales y reduciendo los impactos ambientales asociados a la desalinización como componente de sistemas productivos integrados, alineados con los principios de la agronomía marina y la economía circular.

3.4. Relación entre la industria de minerales e hidrocarburos con el agua de mar

La industria minera, incluida la industria de los hidrocarburos representa una alta demanda hídrica, que reduce la disponibilidad del agua dulce para garantizar su continuidad operativa en contextos de estrés hídrico. En regiones costeras y áridas, el agua de mar se ha consolidado como una alternativa estratégica para suplir requerimientos industriales, reducir la presión sobre fuentes continentales y mitigar conflictos socioambientales derivados de la competencia por el recurso hídrico.

En el sector minero, el uso de agua de mar surge como respuesta a la creciente demanda de agua asociada al tratamiento de sulfuros de cobre y minerales no metálicos, así como la disminución progresiva de las leyes del mineral, lo que incrementa el volumen del material y el consumo de agua y energía. Hacer uso del agua de mar en operaciones mineras no solo permite sostener la productividad, sino que también contribuye a liberar agua dulce para otros usos prioritarios como el consumo humano, la agricultura y la recuperación de los ecosistemas (Vega Farfán, 2020). Como particularidad adicional, la minería además de requerir grandes volúmenes del recurso puede generar agua durante las etapas de explotación. Cuando las operaciones alcanzan la capa freática, se hace necesario bombear agua subterránea para continuar con la extracción, generando flujos hídricos adicionales que deben ser gestionados de forma adecuada. En este contexto, estudios técnicos indican que el consumo de agua en operaciones mineras oscila entre 1.5 y 3 m³ por tonelada de mineral tratado, dependiendo del tipo de mineral, la tecnología empleada y la eficiencia de los sistemas de

recirculación (Vega Farfán, 2020). La sustitución parcial o total de agua dulce por agua de mar en estos procesos representa una estrategia relevante para mejorar la sostenibilidad hídrica del sector.

No obstante, el uso de agua de mar en la minería implica desafíos asociados a su elevada salinidad que puede provocar corrosión en equipos, interferencias en los reactivos de flotación y un mayor consumo energético cuando se requieren procesos de desalinización. Estos factores inciden directamente en los costos operativos y en la huella ambiental de las faenas, por lo que su implementación debe evaluarse bajo criterios de eficiencia técnica, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental.

En la industria de los hidrocarburos, la relación con el agua de mar se manifiesta en el contexto de la fracturación hidráulica, una técnica de estimulación ampliamente utilizada para la extracción de petróleo y gas. Esta tecnología demanda grandes volúmenes de agua para la preparación de los fluidos de fracturación: mientras que un pozo convencional puede consumir hasta 200.000 galones de agua, los pozos no convencionales pueden requerir hasta 16 millones de galones, lo que genera una presión significativa sobre las fuentes de agua dulce (Budiman & Alajmei, 2023). Tradicionalmente, los fluidos se han preparado utilizando agua dulce superficial o subterránea, sin embargo, la creciente preocupación por la sostenibilidad hídrica ha impulsado el desarrollo de alternativas basadas en el uso de agua de mar.

El uso de agua de mar como fluido de fracturación se ha identificado como una opción viable para reducir el consumo de agua dulce y disminuir los costos asociados a su captación y transporte. Adicionalmente, la concentración elevada de sales en el agua de mar puede reducir el daño a la formación geológica causado por la expansión de arcillas, mejorando la eficiencia del proceso (Budiman & Alajmei, 2023). A pesar de los avances alcanzados, la literatura señala que aún es necesario profundizar en la investigación para optimizar la formulación de fluidos a base de agua de mar y evaluar sus efectos a largo plazo sobre los yacimientos y el entorno ambiental.

Por otra parte, el impacto ambiental generado por la industria de hidrocarburos en el medio marino es la gestión del agua producida durante la extracción. En operaciones terrestres, el agua residual suele reinyectarse en el subsuelo, mientras que en operaciones cercanas al medio marino, su descarga es directamente a este. El agua producida dentro del proceso de extracción puede contener hidrocarburos, metales pesados, dióxido de carbono y compuestos altamente dañinos para los ecosistemas marinos (Nath et al., 2023). La descarga incontrolada de estos efluentes puede afectar la calidad del agua, los sedimentos y la biota marina, generando impactos acumulativos sobre los ecosistemas costeros.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la gestión del agua en la industria de minerales e hidrocarburos representa uno de los mayores desafíos ambientales del sector extractivo. Sin embargo, también abre oportunidades para el desarrollo de enfoques más integrados, como la reutilización del agua producida tratada, el uso de agua de mar como sustituto del agua dulce y la implementación de tecnologías de menor impacto ambiental. Estas estrategias no solo contribuyen a reducir la presión sobre los recursos hídricos continentales, sino que también resultan relevantes para la agronomía marina, al incidir directamente en la calidad del agua costera y en la viabilidad de sistemas productivos marinos y agrícolas en zonas litorales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Mindtech s.a.s., la Universidad del Valle, la Universidad de Córdoba, Polymeiker s.a.s., MT-Solsosting s.a.s., Instituto de Ciencia y Tecnología Analítica Golden-Hammer s.a.s. por los fondos suministrados en el marco del proyecto MT-012025 (C.I. 71408 Univalle) - Convenio MT-AFICAT-202501. Asimismo, agradecen al Departamento Nacional de Planeación de Colombia a través del Sistema General de Regalías por los recursos suministrados en el marco del proyecto BPIN 2020000100261.

Referencias

Agrosavia. (s. f.). *Centro de Investigación Caribia*.

- Ahmad, A., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N. I. **(2021)**. Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *Journal of Environmental Management*, 287, 112271. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112271
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. **(1985)**. *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmaeili, N., & Zhang, H. **(2023)**. Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 12(12), 2253. DOI: 10.3390/plants12122253
- Barcia-Piedras, J. M., Pérez-Romero, J. A., Mateos-Naranjo, E., Camacho, M., & Redondo-Gómez, S. **(2019)**. Effect of prior salt experience on desalination capacity of the halophyte *Arthrocnemum macrostachyum*. *Desalination*, 463, 50–54. DOI: 10.1016/j.desal.2019.03.006
- Bazihizina, N., Papenbrock, J., Aronsson, H., Ben Hamed, K., Elmaz, Ö., Dafku, Z., Custódio, L., João Rodrigues, M., Atzori, A., & Negacz, K. **(2024)**. The sustainable use of halophytes in salt-affected land: State-of-the-art and next steps in a saltier world. *Plants*, 13(16), 2322. DOI: 10.3390/plants13162322
- Ben Hamed, K., Castagna, A., Ranieri, A., Garcia-Caparrós, P., Santin, M., Hernandez, J. A., & Barba Espin, G. **(2021)**. Halophyte based Mediterranean agriculture in the contexts of food insecurity and global climate change. *Environmental and Experimental Botany*, 191, 104601. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2021.104601
- Budiman, O., & Alajmei, S. **(2023)**. Seawater-based fracturing fluid: A review. *ACS Omega*, 8(44), 41022–41038. DOI: 10.1021/acsomega.3c05145
- Chang, Z.-Q., Neori, A., He, Y.-Y., Li, J.-T., Qiao, L., Preston, S.I., Liu, P. & Li, J. **(2020)**. Development and current state of seawater shrimp farming, with an

emphasis on integrated multi-trophic pond aquaculture farms, in China – A review. *Reviews in Aquaculture*, 12, (4), 2544-2558. DOI: 10.1111/raq.12457

Chopin, T., Buschmann, A. H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., Kraemer, G. P., Zertuche-González, J. A., Yarish, C., & Neefus, C. (2001). Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability. *Journal of Phycology*, 37(6), 975–986. DOI: 10.1046/j.1529-8817.2001.01137.x

Chopin, T., Robinson, S. M. C., Troell, M., Neori, A., Buschmann, A. H., & Fang, J. G. (2008). Multitrophic integration for sustainable marine aquaculture. En *Encyclopedia of Ecology*, 3, 2463-2475. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-008045405-4.00065-3

Coc-Coj, O., Cámara-Mota, A., González-Cortés, N., & Jiménez-Vera, R. (2020). La salicornia: una planta halófila con propiedades funcionales. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 7(1), 26-38. <https://www.reibci.org/publicados/2020/jul/3800103.pdf>

Comisión Colombiana del Océano. (s. f.). *Mapa esquemático de Colombia*. <https://cco.gov.co/comision/mapa-esquematico/>

Corporación Ambiental CORALINA, & CEMarin. (2023). *Desalinización y monitoreo ambiental: estrategias para la sostenibilidad hídrica en San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. <https://sonar.cemarin.org/desalinizacion-y-monitoreo-ambiental-estrategias-para-la-sostenibilidad-hidrica-en-san-andres/>

Dai, J., Wang, Z., Li, M., He, G., Li, Q., Cao, H., Wang, S., Gao, Y., & Hui, X. (2016). Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: Long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China. *Field Crops Research*, 196, 180–190. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.06.020

Davy, A. J., Bishop, G. F., & Costa, C. S. B. (2001). *Salicornia* L. (*Salicornia pusilla* J. Woods, *S. ramosissima* J. Woods, *S. europaea* L., *S. obscura* P.W. Ball & Tutin, *S. nitens* P.W. Ball & Tutin, *S. fragilis* P.W. Ball & Tutin and *S.*

dolichostachya Moss). *Journal of Ecology*, 89(4), 681–707. DOI: 10.1046/j.0022-0477.2001.00607.x

Du, T., Kang, S., Zhang, J., & Davies, W. J. (2015). Deficit irrigation and sustainable strategies. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2253–2269. DOI: 10.1093/jxb/erv034

Du, Y., Liu, X., Zhang, L., & Zhou, W. (2023). Drip irrigation in agricultural saline-alkali land controls soil salinity and improves crop yield: Evidence from a global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 880, 163226. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163226

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020. Sustainability in action*. Rome, 244 p. DOI: 10.4060/ca9229en

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action*. Rome. DOI: 10.4060/cd0683en

Ge, Y., Jia, Y., Li, S., & Jie, F. (2025). Optimization of freshwater–saline water resource mixing irrigation under multiple constraints. *Sustainability*, 17(8), 3729. DOI: 10.3390/su17083729

Gleick, P. H., & Cooley, H. (2021). Freshwater Scarcity. *Annual Review Environment and Resources*. 46, 319-348. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-101319

Grigore, M.-N., & Toma, C. (2017). Definition and classification of halophytes. In *Anatomical Adaptations of Halophytes: A Review of Classic Literature and Recent Findings* (pp. 3-28). Springer International Publishing, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-66480-4

Hannachi, S., Steppe, K., Eloudi, M., Mechi, L., Bahrini, I., & Van Labeke, M.-C. (2022). Salt stress induced changes in photosynthesis and metabolic profiles

of one tolerant ('Bonica') and one sensitive ('Black Beauty') eggplant cultivars (*Solanum melongena* L.). *Plants*, 11(5), 590. DOI: 10.3390/plants11050590

Hassani, A., Azapagic, A. & Shokri, N. (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nature Communications*, 12(1), 6663. DOI: 10.1038/s41467-021-26907-3

Hnilickova, H., Kraus, K., Vachova, P., & Hnilicka, F. (2021). Salinity stress affects photosynthesis, malondialdehyde formation, and proline content in *Portulaca oleracea* L. *Plants*, 10(5), 845. DOI: 10.3390/plants10050845

Imbernón-Mulero, A., Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B. Acosta, J. A., & Maestre-Valero, J. F. (2025). Lettuce Growth Under Desalinated Seawater Irrigation: Effects on Yield, Nutrient Uptake, and Soil Properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(4), 8545–8560. DOI: 10.1007/s42729-025-02656-w

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras [INVEMAR]. (s. f.). *Proyectos de investigación*. <https://www.invemar.org.co/es/proyectos>

Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. M. (2019). Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80. DOI: 10.3389/fpls.2019.00080

Ji, X., Tang, J., & Zhang, J. (2022). Effects of salt stress on the morphology, growth and physiological parameters of *Juglansmicrocarpa* L. seedlings. *Plants*, 11(18), 2381. DOI: 10.3390/plants11182381

Kang, S., Zhang, L., Liang, Y., Hu, X., Cai, H., & Gu, B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 55(3), 203-216. DOI: 10.1016/S0378-3774(01)00180-9

Kang, Y., Wang, R., Wan, S., Hu, W., Jiang, S., & Liu, S. (2012). Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid

region with saline ground water of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 109, 117-126. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.02.013

Kirda, C. (2002). Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. En *Deficit Irrigation Practices*. Food and Agricultural Organization of the United Nations. *Water Reports*, 22, 3-10.

Knowler, D., Chopin, T., Martínez-Espiñeira, R., Neori, A., Nobre, A., Noce, A., & Reid, G. (2020), The economics of Integrated Multi-Trophic Aquaculture: where are we now and where do we need to go?. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1579-1594. DOI: 10.1111/raq.12399

Li, Z., Qiu, Z., Xu, J., & Lu, B. (2025). High-performance ferroferric oxide nanocomposite hydrogel for integrated evaporative desalination-crop irrigation bifunctional system toward scalable seawater agriculture. *Chemical Engineering Journal*, 525, 169656. DOI: 10.1016/j.cej.2025.169656.

Liu, X., Wang, Y., Liu, H., Zhang, Y., Zhou, Q., Wen, X., Guo, W., & Zhang, Z. (2024). A systematic review on aquaculture wastewater: Pollutants, impacts, and treatment technology. *Environmental Research*, 262, 119793. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119793.

Lu, D., Liu, L., Bai, Y., An, Q., Cheng, Y., & Huang, G. (2025). Deficit irrigation alleviates the increase in soil salinity content in saline-alkali regions of China and improves irrigation water productivity: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 320, 109872. DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109872.

Lu, K., Failler, P., Drakeford, B. M., & Forse, A. (2024). The development of seawater agriculture: Policy options for a changing climate. *Environmental Development*, 49, 100938. DOI: 10.1016/j.envdev.2023.100938.

Mahmoudi, A., Bostani, M., Rashidi, S., & Valipour, M. S. (2023). Challenges and opportunities of desalination with renewable energy resources in Middle East countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113543. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113543.

- Martínez-Granados, D., Marín-Membrive, P., & Calatrava, J. (2022). Economic Assessment of Irrigation with Desalinated Seawater in Greenhouse Tomato Production in SE Spain. *Agronomy*, 12(6), 1471. DOI: 10.3390/agronomy12061471
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645-663. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911
- Nath, F., Chowdhury, M. O. S., & Rhaman, M. M. (2023). Navigating produced water sustainability in the oil and gas sector: A critical review of reuse challenges, treatment technologies, and prospects ahead. *Water*, 15(23), 4088. DOI: 10.3390/w15234088
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A. H., Kraemer, G. P., Halling, C., Shpigel, M., & Yarish, C. (2004). Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231(1-4), 361-391. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2003.11.015.
- Ntsama, I. S. B., Tambe, B. A., Takadong, J. J. T., Nama, G. M., & Kansci, G. (2018). Characteristics of fish farming practices and agrochemicals usage therein in four regions of Cameroon. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 44(2), 145-153. DOI: 10.1016/j.ejar.2018.06.006
- Ogunfowora, L. A., Iwuozor, K. O., Ighalo, J. O., & Igwegbe, C. A. (2021). Trends in the treatment of aquaculture effluents using nanotechnology. *Cleaner Materials*, 2, 100024. DOI: 10.1016/j.clema.2021.100024.
- Panta, S., Flowers, T., Lane, P., Doyle, R., Haros, G., & Shabala, S. (2014). Halophyte agriculture: Success stories. *Environmental and Experimental Botany*, 107, 71-83. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2014.05.006

- Polthanee, A., Kumla, N. & Simma, B. **(2015)**. Effect of *Pistia stratiotes*, cattle manure and wood vinegar (pyroligneous acid) application on growth and yield of organic rainfed rice. *Paddy Water Environ*, 13(4), 337–342. DOI: 10.1007/s10333-014-0453-z
- Qaswar, M., Jing, H., Ahmed, W., Dongchu, L., Shujun, L., Lu, Z., Cai, A., Lisheng, L., Yongmei, X., Jusheng, G., & Huimin, Z. **(2020)**. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil. *Soil and Tillage Research*, 198, 104569. DOI: 10.1016/j.still.2019.104569
- Rao, S. S., Tanwar, S. P. S., & Regar, P. L. **(2016)**. Effect of deficit irrigation, phosphorous inoculation and cycocel spray on root growth, seed cotton yield and water productivity of drip irrigated cotton in arid environment," *Agricultural Water Management*, 169, 14-25. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.02.008
- Rozema, J., & Flowers, T. **(2008)**. Crops for a salinized world. *Science*, 322, 1478–1480. DOI:10.1126/science.1168572
- Sekar, S., Jeyachandran, S., Giri, J., & Aman, M. **(2025)**. Advancing sustainable agriculture: the potential of seaweed-derived bio pesticides from marine biomass. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 22. DOI: 10.1186/s40643-025-00849-w
- Shaaban, A., Hemida, K. A., Abd El-Mageed, T. A., Semida, W. M., AbuQamar, S. F., El-Saadony, M. T., Al-Elwany, O. A. A. I., & El-Tarabily, K. A. **(2024)**. Incorporation of compost and biochar enhances yield and medicinal compounds in seeds of water-stressed *Trigonella foenum-graecum* L. plants cultivated in saline calcareous soils. *BMC Plant Biology*, 24(1), 538. DOI: 10.1186/s12870-024-05182-6
- Sharma, S. K., & Gupta, I. C. **(1986)**. *Saline environment and plant growth*. Agro Botanical Publishers.

- Silva, E. N. da., Ribeiro, R. V., Ferreira-Silva, S. L., Viégas, R. A., & Silveira, J. A. G. (2011). Salt stress induced damages on the photosynthesis of physic nut young plants. *Scientia Agricola*, 68(1), 62–68. DOI: 10.1590/S0103-90162011000100010
- Taïbi, K., Taïbi, F., Ait Abderrahim, L., Ennajah, A., Belkhodja, M., & Mulet, J. M. (2016). Effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidant defence systems in *Phaseolus vulgaris* L. *South African Journal of Botany*, 105, 306–312. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.03.011
- Troell, M., Halling, C., Neori, A., Chopin, T., Buschmann, A. H., Kautsky, N., & Yarish, C. (2003). Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture*, 226(1–4), 69–90. DOI: 10.1016/S0044-8486(03)00469-1
- Uddin, M. N., Khan, M. A., Nielsen, M., & Nielsen, R. (2025). The potential of integrated multi-trophic aquaculture as an alternative to traditional shrimp farming: A global review of environmental, economic and social sustainability. *Aquaculture Reports*, 45, 103122. DOI: 10.1016/j.aqrep.2025.103122
- Vega Farfán, J. L. (2020). Uso de agua de mar en operaciones mineras.
- Ventura, Y., Eshel, A., Pasternak, D., & Sagi, M. (2015). The development of halophyte-based agriculture: past and present. *Annals of botany*, 115(3), 529–540. DOI: 10.1093/aob/mcu173
- Wang, L., Wang, X., Jiang, L., Zhang, K., Tanveer, M., Tian, C., & Zhao, Z. (2021). Reclamation of saline soil by planting annual euhalophyte *Suaeda salsa* with drip irrigation: A three-year field experiment in arid northwestern China. *Ecological Engineering*, 159, 106090. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106090
- Wang, Q., Zhao, H., Bekele, T. G., Qu, B., & Chen, J. (2023). Citric acid can enhance the uptake and accumulation of organophosphate esters (OPEs) in *Suaeda salsa* rhizosphere: Potential for phytoremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130169. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130169

- Wang, X., Wang, J., Liu, H., Zou, D., & Zhao, H. **(2013)**. Influence of natural saline-alkali stress on chlorophyll content and chloroplast ultrastructure of two contrasting rice (*Oryza sativa* L. japonica) cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 7(2), 289-292.
- Wang, X., Wang, W., Huang, J., Peng, S. & Xiong, D. **(2018)**, Diffusional conductance to CO₂ is the key limitation to photosynthesis in salt-stressed leaves of rice (*Oryza sativa*). *Physiologia Plantarum*, 163, 45-58. DOI: 10.1111/ppl.12653
- Xia, H., Liu, H., Gong, P., Li, P., Xu, Q., Zhang, Q., Yang, C., & Meng, Q. **(2025)**. Applying bio-organic fertilizer improved saline alkaline soil properties and cotton yield in Xinjiang. *Scientific reports*, 15(1), 13235. DOI: 10.1038/s41598-025-97776-9
- Yuan, C., Feng, S., Huo, Z., & Ji, Q. **(2019)**. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 212, 424-432. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.09.019



Mindtech s.a.s.

Es una empresa de investigación y desarrollo tecnológico, en ingeniería, ciencia de datos, ciencias fundamentales como la química y la microbiología, agricultura, acuicultura y desarrollo rural, desarrollo sostenible, ciencia de los materiales, ciencias ambientales, agronomía y desarrollo rural, ciencias analíticas aplicadas a problemas científicos, industriales y sociales, entre otras.

Cuenta con un grupo de investigación reconocido por el Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación de Colombia, Mindtech Research Group, ha liderado proyectos a nivel nacional de investigación básica y aplicada, desarrollo tecnológico e innovación. Ha sido la cofundadora de la iniciativa AFICAT que converge en la actualidad a diversas instituciones públicas y privadas a nivel nacional, contribuido con la formación de capital humano a nivel posdoctoral, doctoral, maestría y pregrado.

www.mindtech.com.co

