

Propuestas para Chile

CAPÍTULO 3

Fortalecimiento del marco regulatorio ambiental para el desarrollo sustentable de la desalinización en Chile

EDUARDO LEIVA¹

Facultad de Química y de Farmacia UC, Facultad de Ingeniería UC,
Centro de Derecho y Gestión de Aguas UC y Consorcio Tecnológico
del Agua COH₂O

CHRISTIAN GONZÁLEZ

Facultad de Ingeniería y Ciencias UDP y Consorcio Tecnológico
del Agua COH₂O

CONSUELO RÁMILA

Investigadora independiente

DANIELA RIVERA

Facultad de Derecho UC y Centro de Derecho y Gestión de Aguas UC

FERNANDA RODRÍGUEZ-ROJAS

Facultad de Ciencias Naturales y Exactas UPLA y HUB Ambiental UPLA

Fortalecimiento del marco regulatorio ambiental para el desarrollo sustentable de la desalinización en Chile

INVESTIGADORES

EDUARDO LEIVA¹

Facultad de Química y de Farmacia UC, Facultad de Ingeniería UC,
Centro de Derecho y Gestión de Aguas UC y
Consortio Tecnológico del Agua COTH₂O

CHRISTIAN GONZÁLEZ

Facultad de Ingeniería y Ciencias UDP y
Consortio Tecnológico del Agua COTH₂O

CONSUELO RÁMILA

Investigadora independiente

DANIELA RIVERA

Facultad de Derecho UC y Centro de Derecho y Gestión de Aguas UC

FERNANDA RODRÍGUEZ-ROJAS

Facultad de Ciencias Naturales y Exactas UPLA y HUB Ambiental UPLA

RESUMEN²

La escasez hídrica que enfrenta Chile ha impulsado la expansión de la desalinización como fuente estratégica para reforzar la seguridad hídrica. Si bien esta tecnología permite asegurar un suministro continuo de agua, su desarrollo plantea desafíos ambientales relevantes. Uno de ellos corresponde a los impactos potenciales sobre los ecosistemas marinos durante la etapa de operación de las plantas. Los procesos de captación de agua de mar y descarga

1 Todos los autores son primeros autores, en tanto contribuyeron de forma equivalente al contenido del documento. Además, las y los investigadores desean agradecer el trabajo y la dedicación de Carolina Rodríguez y Pamela Pimentel por su valioso apoyo en la recopilación y sistematización de la información, un insumo clave para las propuestas planteadas en este documento, así como por su colaboración en la elaboración final del mismo. Asimismo, agradecemos al Sindicato Falucheros de Caldera, Aguas CAP y Nueva Atacama por compartir su experiencia y aportar con su visión práctica sobre la desalinización; y a los asistentes de los talleres 1 y 2 organizados por el Centro de Políticas Públicas, por sus valiosos aportes al proyecto.

2 Esta propuesta fue presentada en un seminario organizado por el Centro de Políticas Públicas UC, realizado el 27 de noviembre de 2025. En dicha instancia participaron como panelistas Patricio Winckler, académico de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, y Juan Cristián Moscoso, jefe de la División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana del Sistema de Evaluación Ambiental.

del descarte (salmuera) pueden afectar la calidad del agua, los sedimentos y la biota marina, con magnitudes aún inciertas a largo plazo. Por lo mismo, es necesario contar con un marco regulatorio ambiental robusto que asegure el desarrollo sostenible de esta industria. Actualmente, el país carece de una regulación específica, lo que ha derivado en una evaluación ambiental basada en causales de ingreso generales y criterios aplicados caso a caso, generando vacíos en aspectos críticos como la regulación de la salinidad en el área de descarga y la definición de zonas de exclusión para captación y descarga.

Este artículo analiza los principales impactos de la operación de plantas desalinizadoras sobre los ecosistemas marinos, identifica brechas del marco regulatorio ambiental y contrasta la experiencia nacional con marcos normativos internacionales, incluyendo Australia, California y España. A partir de este análisis, se proponen recomendaciones de política pública para fortalecer los procesos de evaluación y seguimiento ambiental, e incorporar el principio precautorio en el desarrollo de la industria. Adicionalmente, se proponen líneas de investigación prioritarias para disminuir la incertidumbre respecto a impactos potenciales de esta industria. Este documento busca aportar evidencia técnica y regulatoria para apoyar la toma de decisiones y contribuir a la construcción de una gobernanza ambiental robusta para el desarrollo de la desalinización en Chile.

1. Introducción

Chile enfrenta una de las crisis hídricas más severas de su historia reciente (Rivera y Donoso, 2025). La disminución sostenida de las precipitaciones, el retroceso acelerado de glaciares y la sobreexplotación de cuencas han reducido la disponibilidad de agua superficial y subterránea a niveles críticos (Jódar et al., 2024). Este escenario ha intensificado las tensiones entre actividades productivas, asentamientos urbanos y comunidades rurales, además de provocar impactos ecosistémicos (Sepúlveda Hernández, 2025), volviendo urgente diversificar las fuentes de agua.

La desalinización de agua de mar se presenta como una alternativa eficaz para enfrentar la escasez hídrica, especialmente en zonas costeras, al proporcionar caudales constantes y de buena calidad, que no dependen de las condiciones climáticas (Unesco, 2020). Esta tecnología ha emergido como una alternativa para fortalecer la seguridad hídrica (Molinos et al., 2025), constituyendo un componente relevante en la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (Ministerio de Obras Públicas y Dirección General de Aguas, 2012). Nuestro país lidera la expansión de esta industria en América Latina (Sola et al., 2024a), con un desarrollo concentrado en las zonas costeras del norte, donde cerca del 80% del agua producida se destina a la minería y el 20% al consumo urbano (Sola et al., 2024b). La capacidad de desalinización instalada, considerando las plantas medianas y grandes, alcanza los 11.000

litros por segundo. Se espera que esta cifra se cuadruple en los próximos años, teniendo en cuenta los proyectos en construcción y aquellos en etapa de factibilidad³. La tecnología predominante es la ósmosis inversa de agua de mar (SWRO, por sus siglas en inglés), la cual representa el 90% de la capacidad instalada⁴.

Si bien la desalinización permite asegurar el suministro de agua, las plantas SWRO pueden generar impactos ambientales en distintas dimensiones. Entre dichos impactos, genera preocupación la potencial afectación de los ecosistemas marinos durante la etapa de operación (Nielsen et al., 2024; Sirota et al., 2024). Tanto la captación de agua de mar como la descarga del descarte (salmuera) pueden alterar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas marinos costeros, potencialmente reduciendo la disponibilidad de recursos marinos y la biodiversidad. Estos efectos pueden repercutir en actividades como la pesca artesanal, la recolección de orilla y el buceo recreativo, afectando el sustento de las comunidades que dependen de ellas. Aunque la magnitud de estos impactos depende de las condiciones locales y pueden reducirse aplicando mejores tecnologías y criterios de localización adecuados, persiste una alta incertidumbre respecto de sus efectos acumulativos y de largo plazo (Nielsen et al., 2024; Sirota et al., 2024). Además, dado que los ecosistemas marinos presentan ya alta vulnerabilidad frente al cambio climático y otras presiones antrópicas, la expansión de la desalinización debe minimizar sus potenciales impactos, lo que requiere una regulación ambiental robusta basada en evidencia científica.

Chile aún carece de una regulación específica para la desalinización. En materia ambiental, la revisión y aprobación de estos proyectos se realiza a través del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), regulado en la Ley N° 19.300 y en el Decreto Supremo N° 40 del Ministerio del Medio Ambiente (2013). Sin embargo, aspectos críticos propios de esta actividad, como la descarga de salmuera, carecen de normas nacionales específicas, lo que podría representar un riesgo para los ecosistemas costeros del país. Frente a la ausencia de legislación específica, el Estado ha impulsado iniciativas normativas para regular el sector. Actualmente, se encuentra en tramitación el proyecto de ley sobre uso de agua de mar para desalinización (Boletín N° 11.608-09), cuyo objeto es regular el desarrollo sostenible de la actividad, considerando el resguardo de la biodiversidad y el uso sostenible de los ecosistemas marinos y costeros. De esta manera, resulta esencial analizar si los impactos sobre los ecosistemas marinos (y la incertidumbre asociada) están siendo abordados de forma suficiente en la normativa vigente y en dicho pro-

3 Asociación Chilena de Desalación y Reúso A. G. (2025), Catastro de proyectos, disponible en <https://n9.cl/kzgmee>.

4 Asociación Chilena de Desalación y Reúso A. G. (2025), Catastro ACADES: Plantas desaladoras de agua de mar en Chile, disponible en <https://n9.cl/j58ow>.

yecto de ley, así como identificar las brechas y posibles mejoras que podrían incorporarse.

El objetivo de este capítulo es proponer mejoras a las regulaciones ambientales actuales, así como los proyectos en discusión, aplicables a plantas desalinizadoras de agua de mar en Chile, con el fin de minimizar efectos negativos sobre los ecosistemas marinos y así promover el desarrollo sostenible de esta industria. Para lograrlo, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- 1.1 Identificar los potenciales impactos de las plantas desalinizadoras sobre los ecosistemas marinos en Chile.
- 1.2 Identificar y analizar brechas del marco regulatorio ambiental aplicable a la desalinización en Chile, incluyendo la normativa vigente y los proyectos de ley en discusión.
- 1.3 Proponer políticas públicas orientadas a minimizar los impactos ambientales de la desalinización en los ecosistemas marinos.

2. Metodología

La metodología aplicada para abordar los objetivos específicos se describe a continuación.

- 2.1 Identificar los potenciales impactos de las plantas desalinizadoras sobre los ecosistemas marinos en Chile. Se realizó una revisión bibliográfica que consideró, en primer lugar, literatura internacional para identificar los efectos reportados de la operación de plantas SWRO a nivel mundial y, posteriormente, una revisión exhaustiva de estudios que reportan impactos en ecosistemas marinos chilenos. Se identificaron los efectos potenciales en la calidad del agua, los sedimentos y la biota, así como medidas recomendadas para disminuir dichos efectos. La revisión incluyó artículos científicos⁵ e informes técnicos de organismos públicos, universidades y organizaciones de la sociedad civil (Vicuña et al., 2022; IDRO, 2025; Saavedra-Löwenberger et al., 2023; Fundación Terram, 2025; FIMA, 2023).
- 2.2 Identificar y analizar brechas del marco regulatorio ambiental aplicable a la desalinización en Chile, incluyendo la normativa vigente y los proyectos de ley en discusión. Se analizó el marco regulatorio ambiental aplicable a la desalinización en Chile. Para ello, se realizó un mapeo de la normativa vigente y de los proyectos de ley en tramitación, identificando las reglas y lineamientos más relevantes. Además, se revisó la normativa de tres casos de estudio internacionales: España, Australia y California, que fueron seleccionados ya que tienen un importante desarrollo de la desalinización y han generado marcos normativos que regulan los principales aspectos de esta actividad. Con base a estos insumos, se identificaron brechas re-

5 Se excluyeron los no indexados en Web of Science.

gulatorias, evaluando si el marco regulatorio vigente y proyectado resulta suficiente para minimizar los impactos ambientales identificados en el primer objetivo específico. Asimismo, se contrastaron las disposiciones chilenas vigentes con los referentes internacionales analizados.

- 2.3 Proponer políticas públicas orientadas a minimizar los impactos ambientales de la desalinización en los ecosistemas marinos. A partir de las brechas identificadas en el segundo objetivo específico, se propusieron mejoras al marco normativo que permitan minimizar los impactos de la desalinización en los ecosistemas marinos. También, se definieron líneas de investigación prioritarias para reducir las brechas del conocimiento científico actual.

3. Potenciales impactos de las plantas desalinizadoras y medidas para minimizarlos

El funcionamiento de una planta SWRO comprende cuatro etapas: (i) captación de agua de mar, realizada mediante sistemas abiertos o subsuperficiales; (ii) pretratamiento, donde se remueven del agua de mar los sólidos en suspensión, microorganismos y otras sustancias mediante filtración, y se adicionan químicos para proteger las membranas de ósmosis inversa; (iii) filtración por ósmosis inversa, en la cual el agua es presurizada y atraviesa membranas semipermeables, generando agua dulce y un efluente hipersalino (salmuera) equivalente al 40% o 50% del volumen de agua captado; y (iv) postratamiento.

Los impactos sobre los ecosistemas marinos se concentran en las etapas de captación de agua de mar y descarga de efluentes provenientes de los procesos de pretratamiento y ósmosis inversa (salmuera). Estos son sitio-específicos, dependiendo fuertemente de la localización geográfica, diseño y operación de las plantas, como se discute a continuación.

3.1 Impactos de la captación de agua de mar sobre los ecosistemas marinos

Durante la captación de agua de mar pueden generarse impactos tanto por la extracción de agua como por las actividades de limpieza de las estructuras. La extracción puede succionar organismos marinos provocando su colisión (cuando los de mayor tamaño impactan las rejillas de las estructuras), aprisionamiento (cuando ingresan y quedan atrapados en la tubería) o arrastre (cuando los más pequeños avanzan hacia las etapas de pretratamiento). El arrastre de plancton (huevos y larvas de peces y moluscos, fitoplancton, propágulos de algas) es la principal causa de mortalidad asociada a la captación y puede producir efectos generalizados en el ecosistema marino (Nielsen et al., 2024). Por otra parte, durante la limpieza se puede afectar la calidad del agua al incrementar la turbidez o incorporar elementos tóxicos (Nielsen et al., 2024). La magnitud de los impactos depende del volumen captado, la lo-

calización de la toma y del tipo, diseño y operación del sistema de captación (Missimer y Maliva, 2018).

Aunque se reconoce la existencia de potenciales efectos ecológicos de la captación, persiste a nivel mundial una alta incertidumbre de su alcance (Nielsen et al., 2024). Hay pocos datos cuantitativos sobre los efectos en productores primarios —base de la cadena trófica— y a nivel ecológico en general, especialmente en zonas costeras con intercambio de agua restringido con el océano (bahías cerradas). Además, persiste una limitada comprensión de los impactos del uso de químicos (biocidas) y de la materia orgánica liberada durante la limpieza mecánica. En el caso de Chile, a la fecha no hay estudios científicos publicados que aborden los efectos de la captación.

3.2 Impactos de la descarga de salmuera sobre los ecosistemas marinos

Las aguas de descarte (salmuera) de plantas SWRO provienen mayoritariamente de la propia ósmosis inversa, pero incluyen efluentes del pretratamiento y de la limpieza de membranas. Su composición depende de la calidad del agua captada, el grado de concentración y los productos químicos utilizados. En general, presenta una salinidad elevada, entre 60 y 75 PSU (unidades prácticas de salinidad), casi el doble de la del agua de mar (34 ± 1 PSU en el océano Pacífico). Además, puede contener diversos compuestos químicos, como biocidas, coagulantes férricos, antiincrustantes fosfonatados, detergentes, así como metales pesados, compuestos orgánicos y nutrientes (Valdés et al., 2021).

La salmuera se vierte al mar sin tratamiento previo en la mayoría de las plantas (Omerspahic et al., 2022). Al tener una mayor densidad que el agua de mar, se hunde y avanza por el fondo marino, dependiendo de la batimetría, rugosidad del lecho y las corrientes, impactando principalmente a las comunidades que habitan el fondo marino (Vicuña et al., 2022). Dentro de estas comunidades, denominadas bentónicas, las algas y los pastos marinos son esenciales porque ofrecen refugio y alimento a peces, moluscos y crustáceos, entre otros animales. Estas forman parte de la base de la cadena alimenticia, ayudando a mantener sanos y equilibrados los ecosistemas costeros.

El área afectada por la descarga depende de la eficiencia con que la salmuera se mezcla con el medio circundante y la concentración que alcanza al contactar el fondo marino. Dicha eficiencia está determinada por el diseño del emisario, las características de la salmuera descargada y las condiciones del medio receptor (Gil y Sadhwani, 2025; Winckler, 2021). En el diseño destacan el uso de difusores que incrementan la turbulencia y favorecen la mezcla, la geometría y ángulo de los difusores, así como la profundidad y la distancia de la costa donde se ubica la descarga. En el efluente, los factores relevantes son el caudal, la calidad, la velocidad y la densidad. En cuanto al medio receptor, influyen la batimetría y forzantes como el oleaje, las mareas

y las corrientes. En consecuencia, el área afectada por la descarga puede variar ampliamente. Cuando la salmuera se prediluye y se descarga en zonas de buena circulación, el área impactada puede limitarse a pocas decenas de metros (Vicuña et al., 2022), mientras que descargas con menor eficiencia de mezcla pueden extender los impactos por kilómetros (Sirota et al., 2024).

A continuación, se presentan los potenciales impactos sobre la calidad del agua, los sedimentos y la biota marina en el área afectada por la descarga de salmuera.

a) Impactos sobre la calidad del agua y los sedimentos

La descarga de salmuera puede alterar la calidad del agua y los sedimentos cercanos al emisario (Ihsanullah et al., 2021; Omerpahic et al., 2022; Panagopoulos y Haralambous, 2020). El incremento de la salinidad y la concentración de iones constituye el impacto más evidente en la calidad del agua. Por otra parte, los aditivos químicos pueden alterar la alcalinidad y el equilibrio carbonato/bicarbonato, afectando la estabilidad del pH a nivel local (Vicuña et al., 2022). Además, metales como el cobre y el plomo pueden acumularse en los sedimentos (Sharifinia et al., 2022). Asimismo, la salmuera puede infiltrarse en ellos, elevando la salinidad del agua intersticial. Este proceso reduce el oxígeno disuelto, genera estrés osmótico en microorganismos bentónicos y modifica las comunidades microbianas, promoviendo zonas de reducción de sulfato y metanogénesis más profundas. La acumulación de compuestos fosforados y férricos procedentes de antiincrustantes y coagulantes puede incrementar la actividad bacteriana y favorecer condiciones anóxicas en los sedimentos. Aunque la evidencia es limitada, estas alteraciones podrían alterar la remineralización de materia orgánica, afectando los flujos de nutrientes, la productividad bentónica y las redes tróficas costeras (Sirota et al., 2024).

En Chile, los estudios de los impactos de la descarga de salmuera sobre la calidad del agua y sedimentos son escasos. Los tres publicados a la fecha presentan monitoreos realizados en campañas puntuales (Sola et al., 2024b; Sola et al., 2025; Bonnail et al., 2025). En plantas de Antofagasta (desaladora Aguas Antofagasta y Escondida) y Caldera (desaladora La Candelaria) se registraron incrementos de salinidad <5% en un radio de 100 metros, atribuidos a una rápida dilución generada por los difusores y la dinámica oceanográfica (Sola et al., 2024b). En la desaladora Nueva Atacama (Caldera) se reportó un incremento máximo de salinidad de 3,3% a 25 metros del emisario (Sola et al., 2025). En los sedimentos, Bonnail et al. (2025) reportaron un incremento de 6% de salinidad a 500 metros del emisario de Nueva Atacama, junto con concentraciones elevadas de hierro y aluminio, que asociaron al uso de coagulantes. Si bien los tres trabajos constituyen un avance inicial, su carácter puntual (una sola campaña de medición), y en el caso de Bonnail et al. (2025) basado en solo tres estaciones de monitoreo, impide extraer conclusiones generalizadas. Se necesitan estudios que incorporen va-

riabilidad estacional y monitoreo de largo plazo para comprender los efectos en la calidad del agua y sedimentos en nuestro país.

b) Impactos sobre la biota

La descarga de salmuera puede impactar a los organismos marinos, especialmente a los bentónicos, por el aumento de la salinidad y por la toxicidad de los químicos y metales descargados (Sirota et al., 2024).

Gran parte de los estudios sobre los efectos de las descargas se ha desarrollado en el mar Mediterráneo, utilizando los pastos marinos *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* como organismos centinela (Sánchez-Lizaso et al., 2008). Exposiciones prolongadas a incrementos de salinidad pequeños (2 PSU) respecto a las condiciones naturales (38 PSU) los afectan significativamente, reduciendo su cobertura y aumentando su mortalidad, entre otros efectos (Sánchez-Lizaso et al., 2008; Rodríguez-Rojas et al., 2024). En cuanto a la fauna bentónica, crustáceos y equinodermos muestran una alta sensibilidad, especialmente en etapas larvales, disminuyendo su abundancia y riqueza (De la Ossa Carretero et al., 2016). Hernández-Bentancor y Riera (2025) analizaron los estudios publicados a la fecha sobre efectos en fauna bentónica, concluyendo que las comunidades se ven afectadas y que la mayoría de los impactos se registran a menos de un kilómetro, con algunos casos que superan los dos kilómetros. No obstante, respecto al alcance espacial real y los impactos a largo plazo, concluyeron que la evidencia aún es insuficiente para estimarlos con certeza. Por otra parte, los microorganismos también se afectan por la exposición crónica a la salmuera. Por ejemplo, en algunas desaladoras de Israel, monitoreadas a largo plazo, los foraminíferos disminuyeron su riqueza, densidad poblacional y diversidad funcional (Kenigsberg, Abramovich y Hyams-Kaphzan, 2020).

Los impactos ecológicos de la salmuera pueden amplificarse o reducirse según el contexto y medidas operacionales que se utilicen. Cuando las descargas se encuentran colocalizadas con otras perturbaciones, como instalaciones termoelectricas, pueden generarse efectos sinérgicos que intensifican los impactos (Lykkebo et al., 2019; Kenigsberg, Abramovich y Hyams-Kaphzan, 2020). Por otra parte, la implementación de medidas de diseño u operación puede reducir o revertir los impactos. Estas medidas incluyen, por ejemplo, la implementación de difusores en los emisarios (De la Ossa Carretero et al., 2016) y la dilución de la salmuera previa a la descarga (Sola et al., 2020).

En general, un aspecto crítico que emerge de la literatura es que la sensibilidad a la salmuera es altamente especie-específica, sin seguir patrones taxonómicos. Así, mientras algunas especies muestran una notable resistencia, otras experimentan efectos subletales o letales frente a pequeños aumentos en la salinidad del medio (Sirota et al., 2024). Esta heterogeneidad impide establecer umbrales generales, obligando a un enfoque de evaluación am-

biental que incorpore estudios multiespecíficos de corto, mediano y largo plazo. Asimismo, la presencia de especies tolerantes no implica ausencia de impacto, ya que una comunidad dominada por pocas especies resistentes puede reflejar una pérdida de biodiversidad funcional.

En Chile existen pocos estudios que aborden los impactos de la salmuera sobre especies marinas, aunque se observa una alta variabilidad en la tolerancia entre especies. Se identificaron solo diez publicaciones en la Web of Science, todas recientes, con aproximaciones experimentales de corto plazo, centradas en especies bentónicas de importancia ecológica (algas y pastos marinos) y económica (loco y macha). Los estudios en macroalgas evidencian respuestas fisiológicas diversas, dependiendo de la especie y las condiciones de exposición. En la desaladora Aguas Antofagasta, investigaciones con trasplantes de varias especies de *Ectocarpus* mostraron una disminución en la eficiencia fotosintética y un aumento del daño oxidativo tras tres días de exposición a salmuera (+ 2 PSU), indicando un estrés severo con posibles consecuencias letales ante exposiciones prolongadas (Rodríguez-Rojas et al., 2020). En la misma zona, el alga *Dictyota kunthii* presentó efectos similares a corto plazo (+ 3 PSU), aunque con signos de recuperación tras una semana, sugiriendo cierta capacidad de adaptación (Muñoz et al., 2023a; 2023b). En Nueva Atacama, trasplantes del alga *Rhodymenia corallina* mostraron estrés durante la exposición inicial a salmuera (+ 1 PSU), seguido de una rápida recuperación, reflejando posible tolerancia a exposiciones cortas (Sola et al., 2025). Por su parte, la kelp o alga parda gigante *Lessonia berteroana* presentó efectos subletales a partir de salinidades superiores a las naturales (+ 5 PSU), con alteraciones fotosintéticas y daño oxidativo (Cruces et al., 2025). En el caso del pasto marino *Zostera chilensis* se observó una alta sensibilidad a incrementos de salinidad (+ 3 PSU) tras diez días de exposición (Blanco-Murillo et al., 2023). En fauna bentónica, investigaciones con larvas y juveniles de *Concholepas concholepas* (loco) y *Mesodesma donacium* (macha) mostraron una alta tolerancia a exposiciones breves (seis horas) de salmuera (+ 5 y + 8 PSU, respectivamente), aunque con efectos fisiológicos transitorios que podrían ser relevantes ante exposiciones repetidas o prolongadas (Manríquez et al., 2024a; 2024b; 2025). Por otro lado, la anémona *Anthothoe chilensis*, abundante en zonas cercanas de descargas de salmuera, evidenció una notable resistencia (Pérez-Hernández et al., 2024). Sin embargo, su amplia proliferación podría alterar la estructura de las comunidades, desplazando especies más sensibles y afectando la diversidad ecológica.

A partir de la literatura nacional e internacional revisada, se desprende que aún no es posible predecir con certeza los impactos que tendrán las descargas de salmuera sobre los ecosistemas marinos chilenos a mediano o largo plazo, así como tampoco fijar límites de salinidad uniformes bajo los cuales asegurar la ausencia de efectos.

3.3 Medidas para reducir los impactos de la operación de plantas por ósmosis inversa de agua de mar (SWRO) sobre ecosistemas marinos

Los impactos de la captación de agua de mar y descarga de salmuera pueden reducirse, considerando medidas de diseño, operación y criterios de localización. A continuación, presentamos algunas medidas eficaces para reducir los impactos de la operación de plantas por ósmosis inversa de agua de mar sobre ecosistemas marinos.

a) Medidas para minimizar los impactos de la captación de agua de mar

La principal medida para minimizar los impactos de la captación es preferir tomas subsuperficiales, con lo cual se evita la succión de organismos (Misismer y Maliva, 2018). Cuando se deba recurrir a captación superficial, la localización es crítica. Debe ubicarse fuera de zonas que posean intercambio restringido con el océano (bahías cerradas), alta productividad biológica, alta sensibilidad ecológica o que sean hábitats de especies amenazadas (Nielsen et al., 2024). Además, se debe mantener una velocidad de ingreso baja ($< 0,15$ metros por segundo) y utilizar mallas con aberturas pequeñas ($< 1,0$ milímetros). Asimismo, es esencial seleccionar químicos y procedimientos de limpieza que minimicen los efectos sobre la biota.

b) Medidas para minimizar los impactos de la descarga de salmuera

Existen varias medidas para reducir los impactos de la descarga de salmuera sobre el ecosistema marino, muchas de las cuales apuntan a maximizar su dilución, disminuyendo así el área afectada. Para ello, existen estrategias de diseño y emplazamiento que han demostrado ser exitosas (Sirota et al., 2024; Vicuña et al., 2022). Entre estas, se encuentra diluir con agua de mar o efluentes previamente tratados (agua residual, por ejemplo) para reducir la salinidad y la concentración de otros compuestos antes de su descarga (Sola et al., 2020). Esto favorece la mezcla al disminuir la densidad y permitir prolongar la permanencia de la pluma en la columna de agua antes de que se deposite en el fondo. Por otra parte, para la descarga se deben preferir emisarios submarinos utilizando difusores para maximizar la dilución inicial en el campo cercano. Incrementar el número de boquillas y optimizar su diseño, considerando tamaño, espaciamiento y ángulo de descarga (30 a 60 grados) (Bashithalshaaer, Persson y Larson, 2015). Orientar las boquillas en la dirección de las corrientes dominantes para promover la mezcla. En cuanto al emplazamiento de la descarga, se deben seleccionar sitios con alta circulación y mezcla hidrodinámica, lo que generalmente ocurre fuera de bahías cerradas o en lugares alejados de la costa (Fernández-Torquemada, Carratalá y Sánchez Lizaso, 2019).

Otra medida prioritaria es evitar la descarga en zonas de importancia ecológica. Se deben evitar zonas de alta productividad biológica o ecológicamente sensibles, como aquellas con presencia de especies clave (por ejemplo, macro-

algas o pastos marinos), protegidas o sensibles a la salmuera. En este sentido, el uso de herramientas geoespaciales, teledetección y modelos de aprendizaje automático (*machine learning*) permiten identificar sitios óptimos para puntos de descarga, minimizando riesgos ambientales (Marzouk et al., 2025).

Adicionalmente, la toxicidad de la salmuera puede disminuirse reemplazando los aditivos químicos por alternativas biodegradables o menos tóxicas (Pervov, Andrianov y Danilycheva, 2018; Panagopoulos y Haralambous, 2020), utilizando captaciones subsuperficiales que permiten reducir los químicos empleados en el pretratamiento y prefiriendo la recolección y tratamiento en tierra de los lodos de lavado de filtros (Sirota et al., 2024). En el largo plazo, se debe apuntar a evitar la descarga. Tecnologías como la de mínima descarga líquida (MLD), cero descargas líquidas (ZLD) y la valorización de salmuera mediante recuperación de metales o energía son prometedoras, aunque aún limitadas por su alto costo y requerimientos energéticos (Lee y Lee, 2025; Ihsanullah et al., 2021).

4. Identificación y análisis de brechas del marco regulatorio ambiental en Chile

En esta sección se identifica y revisa la normativa ambiental vigente —y proyectada— aplicable a plantas desalinizadoras, enfocada en la regulación de impactos en ecosistemas marinos durante la operación. También se revisa la normativa internacional en relación con tres casos de estudio y se presenta el resultado del análisis de brechas.

4.1 Normativa ambiental vigente aplicable a plantas desalinizadoras

Chile carece de una norma específica e integral de desalinización, lo cual no ha impedido la construcción y operación de infraestructura de esta índole. En lo relativo a los aspectos ambientales, los proyectos se evalúan y autorizan a través del SEIA, donde las principales reglas aplicadas son:

a) Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994)

Establece las bases del SEIA, instrumento obligatorio para todo proyecto susceptible de causar impacto ambiental. Las plantas desalinizadoras no están expresamente incluidas entre las actividades o proyectos que deben someterse al SEIA (artículo 10). Sin embargo, todas las existentes en el país y que presentan una escala o capacidad de producción importante han sido evaluadas ambientalmente. En general, ingresan de manera indirecta en función de las obras asociadas, como acueductos —letra a)— o sistemas de agua potable y emisarios submarinos —letra o)—. En este contexto, la desalinización se evalúa por su afectación al medio marino, debiendo el titular predecir y evaluar los impactos, justificando, de ser significativos, medidas de mitigación, reparación y compensación. De aprobarse, el titular de la resolución de calificación ambiental debe cumplir y hacer seguimiento de dicha autorización, bajo la fiscalización de la Superintendencia del Medio Ambiente.

b) Decreto Supremo N° 40 (2013) del Ministerio del Medio Ambiente: Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

Establece las disposiciones por las cuales se rige el SEIA y la participación de la comunidad en el proceso de evaluación de impacto ambiental. En concordancia con la Ley N° 19.300, no menciona a las plantas desalinizadoras entre los proyectos o actividades que deben someterse al SEIA (artículo 3).

c) Decreto Supremo N° 90 (2000) del Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Norma de emisión de contaminantes en aguas marinas y continentales superficiales

Establece límites máximos para contaminantes en efluentes descargados a cuerpos de agua. En las tablas 4 y 5⁶ define los parámetros aplicables a las descargas en el medio marino dentro y fuera de la zona de protección litoral.

d) Guías del Servicio de Evaluación Ambiental

En virtud de lo dispuesto en el artículo 81 letra d) de la Ley N° 19.300, el SEA ha elaborado guías (actos administrativos de jerarquía infralegal) que aplican a la evaluación de impactos de plantas desalinizadoras (SEA, 2022; 2023a; 2023b; 2023c; 2024a; 2024b). Dentro de ellas, destacan dos:

- *Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA* (SEA, 2023a). Unifica los criterios, antecedentes y requisitos para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras. Se centra en la descripción del proyecto y en la normativa ambiental aplicable, incluyendo los permisos ambientales sectoriales (PAS). Además, identifica los impactos ambientales más comunes y enuncia algunas situaciones de riesgos o contingencias. No incluye la determinación, cuantificación o evaluación de los impactos, así como tampoco la determinación del área de influencia. Sí establece criterios para caracterizar la descarga y los sistemas de captación de agua de mar y descarga de efluentes. Hace presente que los insumos químicos utilizados en la operación deberán contar con la evaluación y autorización de la autoridad marítima (circular A-52/008, aprobada por resolución de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante, mediante el ordinario 12600/6-2020)⁷ y que se debe evaluar la aplicabilidad del permiso ambiental sectorial N° 115⁸.
- *Guía para la predicción y evaluación de impactos en ecosistemas marinos* (SEA, 2024a). Entrega lineamientos y criterios para predecir y evaluar impactos ambientales sobre ecosistemas marinos, presenta las medidas de

6 Para más información al respecto, ver <https://n9.cl/prcb5>.

7 Esta circular indica que deben realizarse ensayos de toxicidad aguda (48 horas de exposición) y crónica (96 horas de exposición) en al menos una especie señalada en la circular, así como evaluar el riesgo ecológico.

8 “Permiso para introducir o descargar materias, energía o sustancias nocivas o peligrosas de cualquier especie a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional”, que se establece en el artículo 140 del Decreto Supremo N° 1 de 1992 del Ministerio de Defensa Nacional (Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática). El requisito para su otorgamiento consiste en que la descarga no genere efectos adversos en las especies hidrobiológicas o en los ecosistemas acuáticos.

mitigación, reparación y compensación para hacerse cargo de los impactos significativos, además de las directrices para elaborar planes de seguimiento o compromisos ambientales voluntarios. Aborda la desalinización en su segundo y cuarto ejemplo, indicando que, a falta de normativa nacional respecto a umbrales de salinidad en el área de descarga, los criterios o indicadores aplicables a la descarga se basan en la *Australian water quality guidelines for fresh and marine waters* (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 1992) y en el estándar de calidad secundaria español (Real Decreto N° 927/1998), en los cuales se establece como nivel de salinidad límite el 5% y 10% sobre la salinidad base del medio receptor, respectivamente. La guía indica también que se deben incluir mediciones continuas de salinidad y temperatura en la descarga y establece una velocidad máxima para captación (0,15 metros por segundo).

4.2 Normativa ambiental contenida en el proyecto de ley sobre desalinización

El proyecto de ley sobre uso de agua de mar para desalinización, tramitado en el Boletín N° 11.608-09, fue ingresado en 2018 y recientemente aprobado en el Senado (4 de noviembre de 2025), encontrándose actualmente en su segundo trámite constitucional ante la Cámara de Diputados⁹. Desde un punto de vista ambiental, se contemplan aristas tales como: (i) la elaboración de una estrategia nacional de desalinización, que debe considerar instrumentos como los planes estratégicos de recursos hídricos en cuencas, los de planificación territorial y costera, de gestión ambiental y cambio climático, los planes de desarrollo de las empresas de servicios sanitarios, de gestión del riesgo de desastres en la zona costera, entre otros; debe, además, contener un plan de desarrollo sostenible de la desalinización, identificar criterios para determinar las zonas con mayor aptitud para la extracción, conducción y desalinización de agua de mar, y para definir bahías o áreas de bahías en que se recomienda evitar disposición de salmueras por sus especiales características, como batimetría, corrientes o biota; debe promover innovación en eficiencia hídrica y energética e incluir mecanismos para promover la reducción o reutilización de residuos y todo otro impacto adverso del proceso de desalinización; (ii) se contemplan concesiones o destinaciones para la desalinización, cuya compatibilidad con las zonas terrestres o marinas bajo protección oficial se definirá en función de la Ley N° 21.600, además de estar regidas por el interés público que implica un uso sostenible de los ecosistemas marinos y costeros; (iii) hay una remisión a la Ley N° 19.300 y al reglamento del SEIA para la evaluación ambiental de los proyectos de desalinización, incorporándose una modificación a la citada ley, en el sentido de incluir, como nueva causal de ingreso al SEIA, “plantas de desalinización

⁹ Al cierre de este texto (2 de marzo de 2026), la última actualización de la tramitación de este proyecto de ley indica que, con fecha 27 de enero de 2026, la Cámara de Diputados lo aprobó con algunas enmiendas, lo que debe ser revisado en el Senado. Información disponible en: http://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_ini=11608-09.

de dimensiones industriales y proyectos de extracción intensiva de agua de mar”; y (iv) se faculta expresamente al Ministerio del Medio Ambiente para desarrollar una norma de emisión que regule la descarga de salmueras y otros productos provenientes de las instalaciones y procesos de plantas desaladoras de aguas marinas.

4.3 Normativas ambientales internacionales sobre desalinización

A continuación, se presentan las normativas ambientales que regulan la captación de agua de mar y descarga de salmuera en Australia, España y California.

a) Australia

La regulación ambiental de la desalinización se estructura bajo un marco federal-estatal. A nivel nacional, la *Environment Protection and Biodiversity Conservation Act* (1999) establece la obligación de someter a evaluación los proyectos con posible impacto en hábitats o especies marinas de importancia nacional. Complementariamente, la *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality* fija valores guía para la calidad del agua marina, incluyendo criterios de salinidad, pH y temperatura, que sirven de referencia para definir zonas de mezcla y límites de protección ecológica (Australian and New Zealand Governments, 2018). Además, establece valores guía por defecto para la calidad del agua marina en distintas zonas de Australia, recomendados cuando no existen valores jurisdiccionales o específicos del sitio. Para salinidad, los valores máximos corresponden al percentil 80 de las mediciones, reportados para las cuatro estaciones. Sin embargo, en ecosistemas de alto valor ecológico, el objetivo es mantener la condición de referencia, equivalente al percentil 50. Cada jurisdicción define el tiempo mínimo de recolección de datos para estimar estos percentiles, con rangos entre uno y dos años.

Las autoridades ambientales de los Estados, como la Environmental Protection Authority of Western Australia, aplican estos lineamientos mediante licencias que especifican criterios de calidad ambiental y zonas de protección ecológica, incorporando límites de aumento de salinidad generalmente inferiores a 1 o 2 PSU en el límite de la zona de mezcla establecida (Environmental Protection Authority of Western Australia, 2016). Este estándar se verifica mediante modelación hidrodinámica y monitoreos periódicos.

En cuanto a tecnología, las plantas australianas emplean captaciones de baja velocidad o túneles de entrada con cribas finas, que reducen la succión de organismos marinos⁹. Para la descarga, los emisarios submarinos con difusores múltiples son la práctica estándar.

⁹ Para más información al respecto, ver Sydney Desalination Plant (2024), *Seawater intake and outfall*, disponible en <https://n9.cl/qo3du>.

La evaluación ambiental se realiza a través de los procesos estatales o, si corresponde, bajo el *Environment Protection and Biodiversity Conservation Act* (1999). Estos estudios incluyen modelaciones de la pluma salina, campañas de línea base y planes de monitoreo adaptativo, conforme a los lineamientos técnicos desarrollados por los gobiernos de Australia y Nueva Zelanda (2018). En caso de que los resultados operacionales superen los criterios ecológicos establecidos, las autoridades pueden ordenar ajustes operativos o suspensiones temporales, en virtud de las condiciones de las licencias ambientales y de la normativa ambiental aplicable.

b) California (Estados Unidos)

Los proyectos de desalinización deben cumplir la *Clean Water Act Federal* y la legislación estatal, en particular la *Porter-Cologne Water Quality Control Act* y la *California Coastal Act*. En 2015, el State Water Resources Control Board incorporó al *California Ocean Plan* una enmienda sobre plantas desalinizadoras. En ella se estableció un límite máximo de salinidad de + 2 PSU sobre el valor natural a 100 metros del punto de descarga (California State Water Resources Control Board, 2015). Para cumplir con esta regulación, se exige la aplicación de la mejor tecnología disponible para minimizar la mortalidad marina (de preferencia prediluir la salmuera y utilizar emisarios con difusores múltiples). La norma exige monitoreos continuos de salinidad y cloro residual, integrados en los permisos de vertido bajo el Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes.

En cuanto a la captación, el Código de Aguas de California —sección 13142.5(b)— exige la aplicación de la mejor tecnología disponible para minimizar la mortalidad marina. La opción prioritaria son las captaciones sub-superficiales, como pozos de playa o galerías de infiltración. Cuando no es técnica y económicamente viable, se permiten tomas abiertas con rejillas ≤ 1 milímetro y velocidad de succión $\leq 0,15$ metros por segundo, acompañadas de estudios de impacto biológico y medidas de compensación ambiental (WaterReuse Association, 2015).

En materia de evaluación ambiental, todo proyecto desalinizador relevante debe elaborar un *Environmental Impact Report* bajo la *California Environmental Quality Act*, analizando alternativas tecnológicas y localizaciones con menor impacto. El proceso incluye revisión pública y supervisión de agencias técnicas como la California Coastal Commission, que evalúa la compatibilidad del proyecto con la conservación de recursos marinos.

c) España

La Ley N° 21/2013 de Evaluación Ambiental exige la evaluación previa de los proyectos de desalación, mientras que la Ley de Costas y su reglamento (Real Decreto N° 876/2014) regulan la captación y vertido en el dominio público marítimo-terrestre (Gobierno de España, 2013). Las autorizaciones

de vertido fijan condiciones de salinidad, caudal y ubicación de emisarios, con base en la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) y la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (2008/56/CE), que imponen la obligación de mantener el “buen estado ecológico” de las aguas costeras.

Aunque España no cuenta con un límite único nacional para la salinidad, las autoridades aplican criterios locales estrictos. En zonas con praderas de *Posidonia oceanica*, hábitat protegido por la Directiva Hábitats (92/43/CEE), la salinidad no debe superar los 38,5 PSU en más del 25% de las observaciones anuales, ni exceder los 40 PSU en más del 5% de ellas (Moreno-Aranda et al., 2024). La salinidad natural del mar en estas áreas corresponde a aproximadamente 37,5 PSU.

Las evaluaciones ambientales incluyen modelaciones de la pluma salina, estudios bentónicos y programas de seguimiento ambiental durante la operación. Cuando se detectan incrementos de salinidad superiores a los umbrales o alteraciones en la biodiversidad marina, las autoridades pueden ordenar la suspensión temporal de vertidos o la modificación de los sistemas de dilución (Navarro-Barrio et al., 2020).

4.4 Análisis de brechas en la normativa vigente

Las principales brechas identificadas en la normativa vigente de Chile sobre aspectos ambientales de la desalinización se presentan a continuación.

a) Ingreso indirecto al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

No existe una tipología de ingreso específico para plantas desalinizadoras al SEIA. Al no figurar como categoría explícita en la Ley N° 19.300 o su reglamento, la mayoría de estas iniciativas ingresan de forma indirecta, lo que resta certeza y seguridad jurídica.

b) Norma de emisión inadecuada para descargas de salmuera y riesgo de prohibición de predilución

La norma de emisión del Decreto Supremo N° 90 (2000) resulta inadecuada para descargas de salmuera. No establece límites para parámetros provenientes de sustancias usadas en el pretratamiento (por ejemplo, sulfatos y fosfonatos dentro de la zona de protección litoral, así como cloruros, fósforo, hierro y sulfatos fuera de la zona de protección litoral).

Adicionalmente, la norma se encuentra en proceso de revisión y su proyecto definitivo —oficio ordinario 02561/2025— adiciona el artículo 7, el cual prohíbe la predilución del efluente con aguas ajenas al proceso industrial. Esta práctica es recomendada para disminuir el impacto de la salmuera y se utiliza —e incluso exige— en California, Australia y España, entre otros casos. De aprobarse dicho proyecto, restringiría la aplicación de esta medida en el país.

Las guías recientes del SEA disminuyen parcialmente el vacío normativo. En ellas se establece el deber de caracterizar el efluente (incluyendo químico-

cos) y evaluar sus efectos en el medio receptor. Aunque no indica valores umbrales para parámetros no regulados en el Decreto Supremo N° 90, señala que se deben contrastar con normas internacionales de referencia. Además, debe solicitarse autorización a la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante para el uso de desinfectantes, detergentes y otros químicos, junto con evaluar la aplicabilidad del permiso ambiental sectorial N° 115 (SEA, 2023a).

A nivel internacional, California exige que la salmuera cumpla con los objetivos de calidad del agua del *Ocean Plan*, las cuales establecen límites de concentración para metales pesados, compuestos orgánicos y otros contaminantes. En España se deben cumplir las normas de calidad ambiental establecidas en el Real Decreto N° 817/2015 y en las resoluciones de cada demarcación hidrográfica, las cuales fijan límites de metales (cadmio, mercurio, plomo, entre otros), compuestos orgánicos e hidrocarburos para no deteriorar el estado ecológico de las aguas. Además, la descarga de biocidas y antiscales se controla mediante las condiciones particulares de vertido fijadas en la autorización de vertido al mar y se exige que se minimicen las concentraciones mediante neutralización y dilución. Cabe mencionar que a nivel internacional la salinidad no se norma en la descarga (norma de emisión), realizándose de acuerdo con lo que se indica a continuación.

c) Inexistencia de norma para la salinidad límite admisible en el área de la descarga

Una brecha crítica en Chile es la inexistencia normativa de un valor límite admisible de salinidad para el área de descarga. En ausencia de este parámetro, y conforme a lo establecido en la Ley N° 19.300, se recurre a normativa internacional de referencia. Las guías del SEA sugieren dos estándares distintos: los de la Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (1992) y el Real Decreto Español 927/1998, ya referidos previamente (SEA, 2023a; 2024a).

Las normas de referencia citadas en las guías del SEA que se han utilizado para definir el área de influencia presentan inconvenientes importantes. En primer lugar, ninguna está vigente. El criterio de la Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (1992) se actualizó en 2000 y 2018 (ver su sección 4.2) y el Real Decreto Español N° 927/1988 (erróneamente citado como 927/1998 en la guía de 2024) que establecía límites de salinidad para aguas continentales salobres fue derogado en 2015. En segundo lugar, al proponer dos normas de referencia el titular puede optar por distintos valores de salinidad límite para definir el área de influencia, lo que ha producido que algunas desalinizadoras utilicen el 10% (+ 3,5 PSU, Minería Candelaria) y otras el 5% (+ 1,7 PSU, Nueva Atacama). Adicionalmente, estas normas derogadas definen una salinidad límite como un porcentaje fijo sobre la salinidad base, por lo que no se consideran las particularidades de los ecosistemas marinos chilenos ni la variabilidad natural de su salinidad.

Como se indicó anteriormente, la tolerancia a la salinidad es altamente especie específica y la evidencia disponible en Chile es insuficiente para definir umbrales máximos, por lo que no es posible descartar impactos fuera del área de influencia, incluso para el criterio más conservador (5%).

d) Falta de exigencias o incentivos para tecnología de captación

A nivel internacional, se norman límites máximos de salinidad en el área de mezcla, ya sea sobre la base de criterios ecotoxicológicos (como en California o España para *Posidonia oceanica*) o en función de la variabilidad natural del sistema receptor (percentiles), como ocurre en Australia.

En Chile no se incentiva la captación subsuperficial, pese a ser la alternativa más eficaz para evitar impactos ambientales de la captación. Las guías del SEA establecen algunos resguardos para reducir la mortalidad larvaria, estableciendo que los sistemas deben diseñarse para reducirla (aunque no exige tomas subsuperficiales), recomendando en tomas abiertas ubicar la succión bajo la termoclina. Además, limita la velocidad de succión (0,15 metros por segundo), aunque sin normar el tamaño de las mallas (SEA, 2023a; 2024a).

En la regulación comparada, California tiene la regulación de captación más alineada con las recomendaciones científicas (Nielsen et al., 2024). Solicita utilizar la mejor tecnología disponible, requiriendo captaciones subsuperficiales donde sea factible. De no ser viables (lo que debe demostrarse), impone requisitos estrictos de diseño y operación de tomas abiertas para proteger la vida marina.

e) Falta de exigencias o incentivos para tecnología de descarga

Las guías del SEA exigen caracterizar el emisario y la descarga y recomiendan la utilización de emisarios submarinos con difusores múltiples, pero no establece exigencias o incentivos respecto a tecnologías (SEA, 2023a; 2024a).

A nivel internacional, California solicita utilizar la mejor tecnología disponible. Se prefiere la predilución con aguas residuales tratadas (municipales, industriales u otras). Los difusores multipuerto son el siguiente método priorizado, debiendo diseñarse para minimizar la zona de mezcla, la suspensión de sedimentos y la mortalidad de toda forma de vida marina. Australia considera el uso de difusores multipuerto como práctica estándar, permitiendo la predilución con agua de mar. En España se exige un diseño hidráulico que garantice la máxima dilución inicial del efluente.

f) Falta de exclusiones de áreas para descarga

No existen reglas vigentes que delimiten ex ante bahías o sectores donde prohibir descargas por razones de batimetría, corrientes o biota. Las guías del SEA no establecen zonas prohibidas para la instalación de emisarios, pese a que recomiendan identificar hábitats de alto valor ecológico, comunidades bentónicas y áreas de baja dispersión. A nivel internacional, Australia aplica

zonas de protección ecológica y condiciona la ubicación según la sensibilidad del hábitat, así como los permisos integran criterios espaciales para resguardar comunidades bentónicas y áreas valiosas. En California está prohibido ubicar la descarga en zonas con hábitats críticos (áreas de surgencia, praderas de zosteras, bosques de kelp, arrecifes rocosos, zonas de reproducción y crianza de peces) y áreas protegidas.

g) Ausencia de seguimiento ambiental y gestión adaptativa con umbrales obligatorios

El monitoreo riguroso del ecosistema marino durante la operación es crítico ante la incertidumbre de los efectos sobre el medio marino. El reglamento del SEIA establece como requisito, tanto para un estudio como para una declaración de impacto ambiental, un plan de seguimiento de las variables ambientales relevantes que fueron objeto de evaluación respecto al ecosistema marino, cuya elaboración debe seguir las instrucciones establecidas en la resolución exenta N° 223/2015 de la Superintendencia del Medio Ambiente. No obstante, aspectos críticos como los parámetros, frecuencia, metodología y definición de puntos a monitorear se definen caso a caso, sin un estándar uniforme. Tampoco se establecen valores máximos permitidos para componentes críticos. En otros países, como Australia, se contemplan programas de monitoreo rigurosos, implementando metodologías estandarizadas. Además, operan con planes de monitoreo adaptativos que permiten realizar ajustes operativos o suspensiones cuando se superan criterios ecológicos.

En síntesis, el análisis realizado indica que la protección de los ecosistemas marinos frente a los potenciales impactos de la desalinización en Chile sigue dependiendo de evaluaciones realizadas caso a caso, mientras que persiste la ausencia de normativa para aspectos críticos (como la descarga). Si bien en los últimos años se han elaborado guías del SEA que avanzan hacia la estandarización de criterios técnicos (SEA, 2023a; 2024a), aún persisten falencias relevantes que deben ser abordadas.

El proyecto de ley tramitado bajo el Boletín N° 11.608-09 constituye un avance y una oportunidad importante para reducir estas brechas. Establece una causal específica de ingreso al SEIA y faculta al Ministerio del Medio Ambiente para dictar una norma de emisión específica para la descarga de salmueras y subproductos. También mandata la elaboración de una estrategia nacional de desalinización, que debe incluir un plan de desarrollo sostenible e identificar criterios para determinar las zonas con mayor aptitud para la extracción de agua de mar, así como para definir las bahías o áreas de bahías donde se debe evitar la descarga de salmueras. Adicionalmente, dicha estrategia debe promover la reducción o reutilización de residuos y la reducción de todo otro impacto adverso del proceso de desalinización. El proyecto contempla, además, que las concesiones sean compatibles con las zonas marinas bajo protección oficial en función de la Ley N° 21.600 y que se rijan por el interés público, incluyendo el uso sostenible de los ecosistemas marinos y costeros.

De acuerdo con lo anterior, el proyecto de ley aborda la mayoría de las brechas identificadas, aunque aún falta: (i) la inclusión de una norma que regule el límite de salinidad en el área de descarga; y (ii) exigir un seguimiento ambiental riguroso. En cualquier caso, la superación de dichas brechas dependerá del contenido final de la ley y de su adecuada implementación.

5. Propuestas de mejoras al marco regulatorio ambiental vigente

Las propuestas para fortalecer el marco regulatorio ambiental vigente —y así minimizar los potenciales impactos de la desalinización sobre los ecosistemas marinos chilenos— que se presentan a continuación, buscan aportar en tres ámbitos: (i) ajustar las principales normas e instrumentos vigentes, (ii) ser un insumo técnico para el diseño de la futura estrategia nacional de desalinización y (iii) contribuir a la discusión legislativa del proyecto de ley sobre desalinización tramitado bajo el Boletín 11.608-09, o bien, luego de finalizarse dicha discusión, a la implementación y eventual revisión o ajuste de la norma aprobada.

5.1 Ingreso obligatorio al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de plantas de tamaño industrial

Tal como señala el proyecto de ley, las plantas desaladoras de dimensiones industriales (concepto que debe definirse técnicamente) deben ser incorporadas expresamente en la tipificación de proyectos del artículo 10 de la Ley N° 19.300, con el fin de eliminar incertidumbres respecto a su vía de ingreso al SEIA. Las plantas de menor escala, considerando sus características, tamaño y/o volumen de agua desalada, podrían estar exentas de evaluación ambiental. No obstante, como los impactos son sitio-específicos, acumulativos y aún inciertos, se debiera evaluar la procedencia de que todos los proyectos deban, al menos, indicar el lugar de captación de agua de mar y vertimiento de salmuera, y presentar una consulta de pertinencia al SEIA, que debiera contar con una guía simplificada donde se presenten las exigencias técnicas mínimas.

5.2 Exigencias para línea de base, evaluación de impactos y seguimiento ambiental

La alta incertidumbre sobre los efectos de la captación y descarga vuelve prioritario que los proyectos cuenten con: (i) línea de base robusta; (ii) modelación adecuada del área de influencia validada en terreno; (iii) predicción y evaluación de impactos rigurosa; y (iv) monitoreo capaz de detectar tempranamente efectos no previstos y activar así medidas correctivas. Estos elementos deben exigirse en todos los proyectos que ingresen al SEIA. Por su parte, el SEA, según lo que disponga el marco legal correspondiente, debiera establecer guías metodológicas unificadas y específicas para desalinización, basadas en el mejor conocimiento científico disponible.

Para elaborar las guías se debiera considerar a un equipo asesor científico e incorporar evidencia reciente. En esta línea, los esfuerzos desarrollados por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (2021), Winckler (2021), Vicuña et al. (2022) e IDRO (2025) pueden servir de base técnica. Asimismo, se recomienda revisar la información generada por los Programas de Vigilancia Ambiental de plantas actualmente en operación, con el fin de evaluar si las variables exigidas y las metodologías aplicadas permiten efectivamente detectar desviaciones respecto de las condiciones ambientales comprometidas, y así identificar mejoras necesarias.

Por otra parte, se debe avanzar en el establecimiento de normas para parámetros críticos como la calidad de los sedimentos (por ejemplo, los metales), así como de criterios para la definición de umbrales para otros parámetros ecológicos relevantes (por ejemplo, la abundancia de organismos críticos para el ecosistema o de importancia económica), que permitan activar medidas operacionales ante efectos no previstos. La entrega de información a la Superintendencia del Medio Ambiente debiera simplificarse mediante tablas con indicadores clave y alertas por superación de umbrales, para así facilitar una fiscalización efectiva.

5.3 Zonas de exclusión para localización de captación y descarga

Existe consenso científico en que la ubicación de la captación y la descarga determinan en gran medida los impactos ecológicos. Por ello, deben definirse áreas de exclusión según su sensibilidad ambiental, quedando fuera los sectores de baja circulación (intercambio restringido con el océano) y aquellos de importancia ecológica, comercial o con sensibilidad reconocida. De especial relevancia son los bosques de macroalgas y las praderas de pastos marinos, que cumplen funciones esenciales en los ecosistemas costeros. Por tanto, las descargas deben emplazarse a suficiente distancia de estos hábitats, garantizando su no afectación. Además, se deben restringir zonas que albergan otras especies o ecosistemas de alto valor ecológico o comercial, tales como especies amenazadas, zonas de alta productividad biológica o bancos naturales de recursos hidrobiológicos. Finalmente, se recomienda que la ubicación de los emisarios esté distante de otras fuentes de perturbación antropogénica a fin de prevenir efectos sinérgicos.

En cuanto a la forma de implementación, los criterios para definir las áreas de exclusión de captación y descarga deben quedar establecidos en la futura estrategia nacional de desalinización, tal como lo contempla el proyecto de ley, aunque la ley debiera establecer una base para determinar tales criterios. No obstante, mientras la estrategia se elabora, se debe evaluar la pertinencia de que el SEA emita una guía con criterios que orienten a los titulares en la selección de sitios adecuados. Esto permitirá minimizar impactos desde la etapa de diseño de la planta y favorecer un proceso de evaluación ambiental más eficiente para el SEA y más predecible para los titulares.

5.4 Incentivos para utilizar la mejor tecnología disponible

Dado que se debe avanzar bajo un enfoque precautorio, es fundamental promover todas las medidas de minimización de impactos que sean técnica, jurídica y económicamente factibles, restringiendo al máximo el área de influencia. En esta línea, el proyecto de ley dispone que la futura estrategia nacional de desalinización debe fomentar la reducción de residuos y de cualquier impacto adverso, por lo que se sugiere que incorpore incentivos para: (i) priorizar la captación subsuperficial; (ii) promover la predilución y el uso de emisarios submarinos con difusores multipuerto y diseños que favorezcan la mezcla; (iii) impulsar el uso de aditivos ambientalmente seguros, desincentivando químicos tóxicos; y (iv) avanzar hacia la minimización de las descargas.

5.5 Nueva norma de emisión para salmuera

Actualmente, el Decreto Supremo N° 90 no es adecuado para regular la descarga de salmuera. De esta manera, tal como aparece en el proyecto de ley, el Ministerio del Medio Ambiente debiera elaborar una norma de emisión específica. Respecto a incorporar el parámetro de salinidad en dicha norma, resulta más atingente normar un umbral en el área de influencia, tal como se realiza en la normativa internacional comparada.

5.6 Nuevo límite de salinidad para el área de influencia

Para identificar y evaluar los impactos de un proyecto es clave definir apropiadamente el área de influencia de los vertidos de salmuera. De manera general, el área de influencia (área de mezcla o *mixing zone*) se ha definido como la región del espacio en donde parámetros de calidad del agua superan valores límites admisibles (Australian and New Zealand Governments, 2018). Dentro de los parámetros relevantes en una descarga de salmuera centraremos la discusión en la salinidad.

El límite admisible de salinidad, utilizado para definir el área de influencia, se establece con el objetivo de proteger a los ecosistemas marinos. Para fijar este valor, la alternativa más robusta es desarrollar estudios ecotoxicológicos locales mediante bioensayos en laboratorio y campo, que evalúen los efectos de la salinidad, considerando la intensidad, duración y frecuencia del estresor. Estos estudios deben incorporar el carácter especie-dependiente de la respuesta biológica, priorizando organismos de relevancia ecológica y económica. En caso de no contar con estos antecedentes —como sucede en Chile—, el enfoque más conservador ante un escenario de incertidumbre sería delimitar el área de influencia como la región del medio marino donde la salinidad supera la salinidad base. Sin embargo, una alternativa menos restrictiva, pero que aún se sustenta en los potenciales efectos sobre el ecosistema marino, es basar la definición en la variabilidad natural del sistema,

como se establece en las *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality* (Australian and New Zealand Governments, 2018). El fundamento de este enfoque radica en que, ante la incertidumbre sobre los efectos ecológicos, si se dispone del conocimiento de que las especies toleran y pueden desarrollarse dentro de los rangos naturales de fluctuación en su medio.

En este estudio proponemos avanzar hacia la elaboración de una norma basada en estudios ecotoxicológicos, sustentados en especies locales, junto con normas secundarias específicas para distintas bahías, en especial aquellas sometidas a múltiples estresores. Mientras se desarrolla esta normativa, se propone utilizar como norma de referencia la metodología actual de la Australian and New Zealand Governments (2018) para delimitar el área de influencia, la cual además cumple con los criterios establecidos en la guía del SEA para el uso de normas de referencia (SEA, 2024c).

En específico, la metodología de la Australian and New Zealand Governments (2018) consiste en seleccionar un sitio de referencia y medir la salinidad mensualmente durante uno o dos años¹⁰. A partir de estos datos se determina el valor bajo el cual se encuentran el 80% de las mediciones, correspondiente al percentil 80 (Q80). Este valor se adopta como umbral de referencia en zonas de mediana protección ambiental¹¹. Posteriormente, se modela la distribución espacial de la salinidad bajo condiciones operacionales de descarga. El límite del área de influencia corresponde a la salinidad simulada, donde se iguala el umbral seleccionado. En otras palabras, la salinidad límite propuesta es el Q80, reemplazando el 5% sobre el nivel base que se utiliza actualmente ($Q50 + 5\% Q50$). Este enfoque incorpora explícitamente la variación natural del medio.

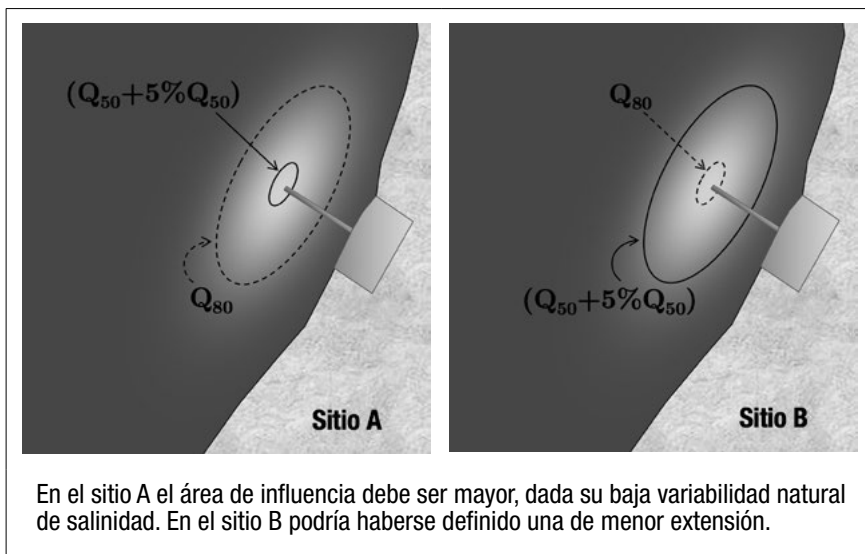
Para ser aún más claros, a continuación exponemos un ejemplo comparativo. Sean dos sitios de estudio, A y B, que presentan la misma salinidad base de 36,5 PSU (Q50). El sitio A presenta una variabilidad natural baja, entre 36 y 37 PSU, con $Q80 = 36,7$ PSU. Mientras, el sitio B presenta alta variabilidad, entre 34 y 39 PSU, con $Q80 = 38,5$ PSU. Según la normativa actualmente utilizada ($Q50 + 5\% Q50$), en ambos casos el límite del área de influencia sería el mismo: 38,3 PSU ($36,5 + 1,8$), aun cuando el ecosistema del sitio A naturalmente nunca está expuesto a salinidades sobre 37 PSU, por lo que no es posible descartar a priori impactos significativos al exponer al ecosistema a salinidades entre 37 PSU y 38,3 PSU. En el sitio A, utilizando la metodo-

10 Si bien la Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (1992) recomienda dos años, en Australia cada jurisdicción define el tiempo mínimo de recolección de datos, el cual puede ser de un año.

11 El valor de salinidad límite corresponde a un percentil tal que no se esperen efectos significativos en el ecosistema. En zonas de menor protección ambiental se podría emplear el Q95 como umbral alternativo y en zonas de alta protección se puede utilizar el Q50.

logía propuesta, el límite sería 36,7 PSU, siendo menor a 38,3 PSU, lo que implica que el área de influencia deberá abarcar una extensión mayor. Por el contrario, en el sitio B el límite propuesto sería 38,5 PSU, lo que implica que el área de influencia abarcaría una región marina menor. Un esquema donde se compara la definición del área de influencia en cada sitio, utilizando los dos criterios, se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema conceptual con la delimitación del área de influencia en dos sitios utilizando la metodología de Australian and New Zealand Governments (2018) (en línea discontinua) y la de Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (1992) (en línea continua).



Fuente: elaboración propia.

Esta norma de referencia, como se indicó, debe reemplazarse por una basada en los efectos sobre organismos marinos. Para los estudios ecotoxicológicos se recomienda considerar organismos sésiles fotosintéticos, como las macroalgas, en particular especies submareales dada su alta relevancia ecológica. Se sugiere incluir también especies de importancia económica y de distintos niveles tróficos para fortalecer la robustez de los análisis a nivel comunitario. La selección de especies debe basarse en aquellas presentes en el área de influencia de la descarga. Se sugiere realizar los bioensayos bajo condiciones controladas de laboratorio, aplicando gradientes de salinidad realistas en función de los valores observados en monitoreos de plantas desaladoras en Chile (por ejemplo, entre 33 y 40 PSU). Se deben evaluar respuestas a corto plazo (1-10 días) y mediano plazo (>10 días hasta los 3 meses) como lo

han hecho en algunos experimentos en mesocosmos de Posidonia, dado que los efectos pueden manifestarse progresivamente. Asimismo, se sugiere comparar los efectos de salmuera artificial preparada con sales de mar con los de salmuera real diluida proveniente de plantas desaladoras, para así discernir efectos atribuibles al aumento de salinidad y aquellos de los aditivos químicos empleados en el proceso. Finalmente, se recomienda realizar experimentos de trasplante en zonas de descarga de desaladoras cercanas, siempre que se mantenga un contexto geográfico y ecológico similar, de modo de validar los resultados en condiciones naturales.

6. Líneas de investigación prioritarias

La alta incertidumbre sobre los efectos a mediano y largo plazo de la desalinización en los ecosistemas marinos exige impulsar investigaciones que los definan con mayor precisión. Al mismo tiempo, se requiere generar conocimiento aplicado para desarrollar tecnologías que minimicen dichos impactos. Esta base científica y tecnológica será fundamental para respaldar mejoras regulatorias continuas y avanzar hacia un desarrollo sostenible del sector. Las líneas identificadas como prioritarias son:

- Evaluar los efectos de las descargas sobre la calidad del agua y los sedimentos marinos, tanto en el campo cercano como en el campo lejano.
- Investigar cuantitativamente los impactos de la captación de agua de mar sobre los ecosistemas marinos, con énfasis en bahías semicerradas o sectores de baja renovación, además de evaluar los impactos asociados al uso de biocidas y a la limpieza mecánica de las estructuras de captación.
- Investigar los impactos de la salmuera en especies de importancia ecológica, comercial y en biodiversidad, considerando efectos a corto, mediano y largo plazo. Se sugiere utilizar como sitios de estudio las plantas actualmente operativas.
- Desarrollar métodos de detección temprana de efectos sobre especies de alto valor ecológico y económico, como las macroalgas. Se recomienda avanzar en diagnósticos fisiológicos mediante biomarcadores o biosensores. Complementariamente, deben investigarse herramientas como bioensayos y experimentos de trasplante para determinar umbrales de tolerancia y evaluar sinergias con otros factores, como la presencia de metales, aumento de temperatura (cambio climático) o contaminantes orgánicos. Ambas aproximaciones deberían ser validadas con estudios de monitoreo in situ a largo plazo.
- Impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías que permitan reducir y reutilizar la salmuera.

7. Conclusiones

La desalinización de agua de mar es necesaria para enfrentar la escasez hídrica que afecta a Chile y resulta indispensable para asegurar el abastecimiento de agua en el mediano y largo plazo. No obstante, para que su expansión sea sustentable, debe estar acompañada de un marco normativo sólido y basado en evidencia científica. Nuestro análisis muestra que, hasta ahora, el crecimiento de la industria ha sido más rápido que el fortalecimiento de la regulación ambiental que la gobierna, lo que genera incertidumbre y limita la capacidad del Estado para anticipar y gestionar adecuadamente los potenciales efectos sobre los ecosistemas marinos.

La operación de plantas desalinizadoras puede generar impactos sobre los ecosistemas marinos, particularmente en las etapas de captación de agua de mar y descarga de salmuera. La magnitud y extensión de estos impactos dependen fuertemente de la localización de la infraestructura y del diseño y operación de la planta. La literatura internacional indica que existe una elevada incertidumbre respecto de los impactos a largo plazo, como también de su extensión espacial. En Chile, esta incertidumbre se incrementa debido a que la evidencia científica es escasa y basada en estudios de corto plazo. En consecuencia, a la fecha no es posible predecir cómo responderán los ecosistemas marinos locales frente a una expansión sostenida de la desalinización.

Así, el principio precautorio debería guiar a la política pública en materia de desalinización. Elementos determinantes para minimizar impactos que se encuentran explícitamente abordados en la normativa internacional revisada, como zonas de exclusión, exigencias tecnológicas y límites de salinidad, deben incorporarse adecuadamente en la normativa nacional. Adicionalmente, dado el escenario de incertidumbre, la exigencia de un monitoreo ambiental riguroso durante la operación resulta crítico para detectar efectos no previstos y ajustar oportunamente la operación. Robustecer la normativa ambiental considerando los aspectos mencionados permitirá que el desarrollo de la desalinización contribuya a la seguridad hídrica sin comprometer la integridad y funcionalidad de los ecosistemas marinos.

Referencias

- Australian and New Zealand Environment and Conservation Council** (1992). *Australian water quality guidelines for fresh and marine waters: National Water Quality Management Strategy*. Disponible en <https://n9.cl/it1yqj>.
- Australian and New Zealand Governments** (2018). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality*. Disponible en <https://n9.cl/jniow>.
- Bashitialshaaer, R., Persson, K. y Larson, M.** (2015). New criteria for brine discharge outfalls from desalination plants. En T. M. Missimer, B. Jones y R. G. Maliva (eds.), *Intakes and outfalls for seawater reverse-osmosis desalination facilities: Innovations and environmental impacts* (pp. 451-467). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-13203-7_19.
- Blanco-Murillo, F., Díaz, M. J., Rodríguez-Rojas, F., Navarrete, C., Celis-Plá, P., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C.** (2023). A risk assessment on *Zostera chilensis*, the last relict of marine angiosperms in the South-East Pacific Ocean, due to the development of the desalination industry in Chile. *Science of the Total Environment*, 883, 1-10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163538.
- Bonnail, E., Rojas-Lillo, Y., DelValls, T. Á. y Cruces, E.** (2025). Physicochemical characterization of desert bay with brine discharge: A case study from Caldera Bay, Northern Chile. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1-10. DOI: 10.3390/jmse13071199.
- California State Water Resources Control Board** (2015). *Water Quality Control Plan – Ocean Waters of California (Ocean Plan)*. Disponible en <https://n9.cl/z5eht>.
- Cruces, E., Rojas-Cepeda, F., Rojas-Lillo, Y., Bonnail, E., Gaete-Fritz, M., Pérez-Mora, G., Cubillos, V., Montory, J. y Perreault, F.** (2025). Combined toxicity of salinity, antiscalants, and coagulants in the sentinel kelp *Lessonia berteroana*: Implications for marine biomonitoring near desalination discharges. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 20, 1-11. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100879.
- De la Ossa Carretero, J. A., Del Pilar Ruso, Y., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L. M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Giménez-Casaldueiro, F. y Sánchez-Lizaso, J. L.** (2016). Bioindicators as metrics for environmental monitoring of desalination plant discharges. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1-2), 313-318. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.12.023.
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante** (2021). *Guía para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la autoridad marítima*. Disponible en <https://n9.cl/znrzf>.
- Environmental Protection Authority of Western Australia** (2016). *Environmental factor guideline: Marine environmental quality*. Disponible en <https://n9.cl/q43r7>.
- Fernández-Torquemada, Y., Carratalá, A. y Sánchez Lizaso, J. L.** (2019). Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced. *Desalination and Water Treatment*, 167, 27-37. DOI: 10.5004/dwt.2019.24615.

- FIMA, Fiscalía del Medio Ambiente** (2023). *Transición socioecológica justa en Chile: Recomendaciones para la protección de los ecosistemas marino costeros frente a la desalación del agua de mar*. Disponible en <https://n9.cl/gha9o>.
- Fundación Terram** (2025). *Herramientas para el debate sobre desalinización: Potenciales impactos y escenario en Chile*. Disponible en <https://n9.cl/2gxbpd>.
- Gil, A. y Sadhwani, J.** (2025). Improvements in the design of brine diffusers in shallow waters: A numerical study applied to the Canary Islands. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(1), 1-10. DOI: 10.1016/j.asej.2024.103225.
- Gobierno de España** (2013). Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental. Boletín Oficial del Estado. Disponible en <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-12913>.
- Hernández-Bentancor, J. y Riera, R.** (2025). Trends in the study and impacts of brine discharge on benthic communities. *Marine Environmental Research*, 210, 1-7. DOI: 10.1016/j.marenvres.2025.107281.
- IDRO** (2025). *Propuestas para guía de evaluación de impactos de plantas desalinizadoras por ósmosis inversa: Metodologías y análisis*. Disponible en <https://n9.cl/12b39>.
- Ihsanullah, I., Atieh, M. A., Sajid, M. y Nazal, M. K.** (2021). Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. *Science of the Total Environment*, 780, 146585. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146585.
- Jódar, J., Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Martos-Rosillo, S. y Lambán, L. J.** (2024). The catastrophic effects of groundwater intensive exploitation and Megadrought on aquifers in Central Chile: Global change impact projections in water resources based on groundwater balance modeling. *Science of the Total Environment*, 914, 1-14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169651.
- Kenigsberg, C., Abramovich, S. y Hyams-Kaphzan, O.** (2020). The effect of long-term brine discharge from desalination plants on benthic foraminifera. *PLoS One*, 15(1), 1-20. DOI: 10.1371/journal.pone.0227589.
- Lee, J. A. y Lee, S.** (2025). Challenges, opportunities, and technological advances in desalination brine mining: A mini review. *Advances in Industrial and Engineering Chemistry*, 1(1), 7. DOI: 10.1007/s44405-025-00007-y.
- Lykkebo, K., Heck, N., G. Reguero, B., Potts, D., Hovagimian, A. y Paytan, A.** (2019). Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions. *Water*, 11(2), 1-21. DOI: 10.3390/w11020208.
- Manríquez, P. H., González, C. P., Abarca Muñoz, A. y Jenó, K.** (2024a). Effects of brine discharges on newly hatched larvae of the rocky-shore keystone gastropod *Concholepas concholepas*. *Desalination*, 581(1), 1-11. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117579.
- Manríquez, P. H., González, C. P., Abarca Muñoz, A., Jofré, V., Astudillo, O. y Aguilera, V. M.** (2024b). Behavioural and physiological responses of the surf clam *Mesodesma donacium* to brine discharges. *Science of the Total Environment*, 922, 171233. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171233.

- Manriquez, P. H., González, C. P., Abarca, A., Jofré, V., Aguilera, V. M. y Astudillo, O.** (2025). Effects of brine discharges on early benthic stages of *Concholepas concholepas*. *Science of the Total Environment*, 996, 180133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180133.
- Marzouk, R., Alkhalidi, T. M., Sakthivelu, U., Saranya, A., Arutperumjothi, G. y Srinivasan, S.** (2025). GIS, remote sensing, and machine learning for identifying optimal locations for seawater intake and brine disposal in coastal desalination systems. *Desalination and Water Treatment*, 323, 1-14. DOI: 10.1016/j.dwt.2025.101355.
- Ministerio de Obras Públicas y Dirección General de Aguas** (2012). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025*. Disponible en <https://n9.cl/5n9e5>.
- Missimer, T. M. y Maliva, R. G.** (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434, 198-215. DOI: 10.1016/j.desal.2017.07.012.
- Molinos, M., Rivera, D., Donoso, G. y Melo, O.** (2025). Desalination in times of drought. En D. Rivera y G. Donoso (eds.), *Droughts in Chile. Impacts, monitoring, and adaptation (management) policies* (pp. 387-407). Springer.
- Moreno Aranda, I. M., Zorzo Gallego, P., Murciano Virto, C., Antequera Ramos, M., Yagüe Muñoz, C., Pérez del Sastre, F., Molina Marin, A., Grassa Garrido, J. M., Martín Gómez, P. y Jiménez Saavedra, M.** (2024). *Evaluación del medio marino – Demarcación marina Estrecho y Alborán: Análisis de presiones e impactos*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España. Disponible en <https://n9.cl/iin787>.
- Muñoz, P. T., Rodríguez-Rojas, F., Celis-Pla, P. S. M., López-Marras, A., Blanco-Murillo, F., Sola, I., Lavergne, C., Valenzuela, F., Orrego, R., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C. A.** (2023a). Desalination effects on macroalgae (part A): Laboratory-controlled experiments with *Dictyota* spp. from the Pacific Ocean and Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1-10. Disponible en <https://n9.cl/znh5b6>.
- Muñoz, P. T., Rodríguez-Rojas, F., Celis-Pla, P. S. M., López-Marras, A., Blanco-Murillo, F., Sola, I., Lavergne, C., Valenzuela, F., Orrego, R., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C. A.** (2023b). Desalination effects on macroalgae (part B): Transplantation experiments at brine-impacted sites with *Dictyota* spp. from the Pacific Ocean and Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1-11. Disponible en <https://n9.cl/a57bc>.
- Navarro-Barrio, R., Sola, I., Blanco Murillo, F. y Del Pilar Ruso, Y.** (2020). Application of salinity thresholds in Spanish brine discharge regulations: Energetic and environmental implications. *Desalination*, 482. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114901.
- Nielsen, K. M., Schlenk, D., Schlenk, D., Esbaugh, A., Esbaugh, A. J., Mondon, J. y Mondon, J. A.** (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.

- Omerspahic, M., Al Jabri, H., Siddiqui, S. A. y Saadaoui, I.** (2022). Characteristics of desalination brine and its impacts on marine chemistry and health, with emphasis on the Persian/Arabian gulf: A review. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1-12. DOI: 10.3389/fmars.2022.845113.
- Panagopoulos, A. y Haralambous, K. J.** (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment. Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111773. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111773.
- Pérez-Hernández, G., Morales, D., Pereira-Rojas, J., Díaz, M. J., Blanco-Murillo, F., Sola, I., Rámila, C., González, C., González, K., Sánchez-Lizaso, J. L., Sáez, C. A. y Rodríguez-Rojas, F.** (2024). The halotolerant white sea anemone *Anthothoe chilensis*, highly abundant in brine discharges zones, as a promising biomonitoring species for evaluating the impacts of desalination plants. *Desalination*, 581, 117612. DOI: 10.1016/j.desal.2024.117612.
- Pervov, A. G., Andrianov, A. P. y Danilycheva, M. N.** (2018). Preliminary evaluation of new green antiscalants for reverse osmosis water desalination. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 167-174. DOI: 10.2166/ws.2017.106.
- Rivera, D. y Donoso, G. (eds.)** (2025). *Droughts in Chile: Impacts, monitoring, and adaptation (management) policies*. Springer Nature. DOI: 10.1007/978-3-031-85040-0.
- Rodríguez-Rojas, F., López-Marras, A., Celis-Plá, P. S. M., Muñoz, P., García-Bartolomei, E., Valenzuela, F., Orrego, R., Carratalá, A., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C. A.** (2020). Ecophysiological and cellular stress responses in the cosmopolitan brown macroalga *Ectocarpus* as biomonitoring tools for assessing desalination brine impacts. *Desalination*, 489, 114527. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114527.
- Rodríguez-Rojas, F., Navarrete, C., Rámila, C., Tapia-Reyes, P., Celis-Plá, P. S. M., González, C., Pereira-Rojas, J., Blanco-Murillo, F., Moreno, P., Gutiérrez-Campos, C., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C. A.** (2024). Transcriptomic profiles and diagnostic biomarkers in the Mediterranean seagrasses *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* reveal mechanistic insights of adaptative strategies upon desalination brine stress. *Science of the Total Environment*, 916, 1-13. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170326.
- Saavedra-Löwenberger, L., Donoso Ferez, K., Cisterna Roa, V. y Lewinsohn Castro, J. L.** (2023). *Análisis de los efectos ecosistémicos del uso de agua de mar y la desalinización para el abastecimiento hídrico de la minería: El caso de Chile*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). Disponible en <https://n9.cl/yymftn>.
- Sánchez-Lizaso, J. L., Romero, J., Ruiz, J., Gacia, E., Buceta, J. L., Invers, O., Fernández Torquemada, Y., Mas, J., Ruiz-Mateo, A. y Manzanera, M.** (2008). Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: Recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1-3), 602-607. DOI: 10.1016/j.desal.2007.01.119.
- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2022). *Guía metodológica para la descripción de ecosistemas marinos*. Disponible en <https://n9.cl/nnagc>.

- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2023a). *Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA*. Disponible en <https://n9.cl/2mrcr2>.
- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2023b). *Guía áreas de influencia en ecosistemas marinos*. Disponible en <https://n9.cl/via7r>.
- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2023c). *Alcances y principios metodológicos para la evaluación de los impactos ambientales*. Disponible en <https://n9.cl/fc3o7x>.
- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2024a). *Guía para la predicción y evaluación de impactos en ecosistemas marinos*. Disponible en <https://n9.cl/72uv5p>.
- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2024b). *Metodologías para la consideración de los impactos acumulativos y sinérgicos*. Disponible en <https://n9.cl/b2i24>.
- SEA, Servicio de Evaluación Ambiental** (2024c). *Criterio de evaluación en el SEIA: Uso de normas de referencia*. Disponible en <https://n9.cl/th8pp>.
- Sepúlveda Hernández, E.** (2025). Drought as a context of intervention in hydrosocial issues: The experience of social workers and their interdisciplinary teams in Chile. *Journal of Progressive Human Services*, 36(2), 245-263. DOI: 10.1080/10428232.2025.2515785.
- Sharifinia, M., Keshavarzifard, M., Hosseinkhezri, P., Khanjani, M. H., Yap, C. K., Smith, W. O., Jr., Daliri, M. y Haghshenas, A.** (2022). The impact assessment of desalination plant discharges on heavy metal pollution in the coastal sediments of the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113599. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113599.
- Sirota, R., Winters, G., Levy, O., Marques, J., Paytan, A., Silverman, J., Sima-Ventura, G., Rahav, E., Antler, G. y Bar-Zeev, E.** (2024). Impacts of desalination brine discharge on benthic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 58(13), 5631-5645. DOI: 10.1021/acs.est.3c07748.
- Sola, I., Fernández-Torquemada, Y., Forcada, A., Valle, C., del Pilar-Ruso, Y., González-Correa, J. M. y Sánchez-Lizaso, J. L.** (2020). Sustainable desalination: Long-term monitoring of brine discharge in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111813. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111813.
- Sola, I., Zarzo, D., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C.** (2024a). Multi-criteria analysis for sustainable and cost-effective development of desalination plants in Chile. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1-9. DOI: 10.3389/fmars.2024.1358308.
- Sola, I., Carratalá, A., Pereira-Rojas, J., Díaz, M. J., Rodríguez-Rojas, F., Sánchez-Lizaso, J. L. y Sáez, C. A.** (2024b). Assessment of brine discharges dispersion for sustainable management of SWRO plants on the South American Pacific coast. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 1-11. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116905.

- Sola, I., Santana-Anticoy, C., Silva-García, R., Pérez-Hernández, G., Pereira-Rojas, J., Blanco-Murillo, F., Díaz, M. J., Sáez, C. A. y Rodríguez-Rojas, F.** (2025). Evaluating physico-chemical and biological impacts of brine discharges for a sustainable desalination development on South America's Pacific coast. *Journal of Hazardous Materials*, 489, 1-12. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137464.
- Unesco, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura** (2020). *The United Nations world water development report 2020: Water and climate change*. Disponible en <https://n9.cl/559aio>.
- Valdés, H., Saavedra, A., Flores, M., Vera-Puerto, I., Aviña, H. y Belmonte, M.** (2021). Reverse osmosis concentrate: Physicochemical characteristics, environmental impact, and technologies. *Membranes*, 11(10), 1-21. DOI: 10.3390/membranes11100753.
- Vicuña, S., Daniele, L., Fariás, L., González, H., Marquet, P. A., Palma-Behnke, R., Stehr, A., Urquiza, A., Wagemann, E., Arenas-Herrera, M. J., Bórquez, R., Cornejo-Ponce, L., Delgado, V., Etcheberry, G., Fragkou, M. C., Fuster, R., Gelcich, S., Melo, O., Monsalve, T., Olivares, M., Ramajo, L., Ramírez-Pascualli, C., Rojas, C., Rojas, C., Vilca-Salinas, P. y Winckler, P.** (2022). *Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile*. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. Disponible en <https://n9.cl/f2y60>.
- WateReuse Association** (2015). *Database of permitting practices for seawater concentrate disposal*. Disponible en <https://n9.cl/wc7g0b>.
- Winckler, P.** (2021). *Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras*. Disponible en <https://n9.cl/329u9>.

CÓMO CITAR ESTE CAPÍTULO:

Leiva, E., González, C., Rámila, C., Rivera, D. y Rodríguez-Rojas, F. (2026). Fortalecimiento del marco regulatorio ambiental para el desarrollo sustentable de la desalinización en Chile. En: Centro de Políticas Públicas UC (ed.), *Propuestas para Chile. Concurso Políticas Públicas 2025*. Pontificia Universidad Católica de Chile, p. 89-120.

Veinte años
Concurso Políticas Públicas / 2025

Propuestas para Chile



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE