

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**METODOS DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR, VENTAJAS Y
DESVENTAJAS, SUS USOS EN LOS CULTIVOS Y CONSUMO HUMANO**

POR

RODRIGO ANTONIO HERNÁNDEZ ALARCON

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILE
2023

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**METODOS DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR, VENTAJAS Y
DESVENTAJAS, SUS USOS EN LA AGRICULTURA Y CONSUMO HUMANO**

POR

RODRIGO ANTONIO HERNANDEZ ALARCON

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÓNOMO**

CHILLÁN – CHILE
2023

Aprobada por:

Profesor Asistente, Marco Antonio Sandoval.
Dr. En Ciencias ambientales.

Guía

Profesor Asistente Walter Andre Valdivia Cea.
Dr. En Ing. Agrícola.

Asesor

Profesor Asistente Christian Cesar Guajardo Fernández
Dr. Ing. Agrónomo.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.
Mención producción Animal

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Desarrollo y Discusión.....	3
Conclusión.....	16
Referencias.....	17

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Constitución de elementos del agua de mar en partes por millón.....	6
Tabla 2 Tipos de agua según su salinidad (ppm).....	6
Tabla 3 Valores de agua desalinizada por proceso de osmosis reversa (RO) y valor considerado adecuado para cada parámetro.....	9
Tabla 4 Valores de sensibilidad de algunos cultivos en relación al sodio intercambiable.....	12
Tabla 5 Evaluación del servicio de abastecimiento y características organolépticas del agua potable según zona hídrica en la ciudad de Antofagasta.....	14
Tabla 6 Comparación entre las ventajas y desventajas de la desalación del agua de mar y sus usos en la agricultura...	15

METODOS DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR, VENTAJAS Y DESVENTAJAS, SUS USOS EN LA AGRICULTURA Y CONSUMO HUMANO.

SEAWATER DESALINATION METHODS, ADVANTAGES AND DISADVANTAGES, THEIR USES IN AGRICULTURE AND HUMAN CONSUMPTION

Palabras índice adicionales: ambiente, cambio climático, agua salada, desalinización, procesos, calidad.

RESUMEN

Las comunidades humanas enfrentan desafíos relacionados con el crecimiento demográfico, el cambio climático, el acceso a fuentes hídricas, la contaminación y la pobreza. La ONU ha propuesto 17 objetivos de desarrollo sostenible para el año 2030, incluyendo la seguridad alimentaria y el acceso a agua limpia. Las técnicas de desalinización y sus usos en la agricultura son una de las estrategias de desarrollo sostenible. Entre ellas se encuentran la evaporación solar, la destilación por membranas, la electrodiálisis y la ósmosis inversa; siendo ésta última la más efectiva, debido al coste, a los procedimientos y los resultados que pueden ser obtenidos al emplearla en una planta desalinizadora, asimismo, por medio de esa técnica, se obtienen los parámetros requeridos o solicitados para emplear el agua en riego y para el consumo humano. Este trabajo tiene como objetivo general realizar una revisión de la información científica que existe con respecto a las técnicas de desalinización, sus usos en los cultivos y consumo humano.

SUMMARY

Human communities face challenges related to population growth, climate change, access to water sources, pollution and poverty. The UN has proposed 17 Sustainable Development Goals for 2030, including food security and access to clean water. Desalination techniques and their uses in agriculture are one of the strategies for sustainable development. These include solar evaporation, membrane

distillation, electrodialysis and reverse osmosis; the latter being the most effective, due to cost, procedures and results that can be obtained by using it in a desalination plant, likewise, through this technique, the parameters required or requested to use the water for irrigation and for human consumption are obtained. The general objective of this work is to carry out a review of the scientific and technological information that exists regarding desalination techniques and their uses in agriculture.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico en los próximos 25 años se espera que aumente en 2 mil millones de personas, pasando de 7700 millones en la actualidad, a 9700 millones de personas para el año 2050 (Organización de las Naciones Unidas, 2020). Los desafíos en las comunidades y el recurso hídrico son complejos. Los recursos hídricos se ven afectados por varios factores, como el cambio climático, la política, la militarización, el control y las desigualdades de accesibilidad. (Programme, 2020)

Una de las soluciones que se plantea sobre el recurso hídrico es la desalinización del agua de mar, la cual aparece como una solución práctica en comunidades donde el agua para el consumo humano y desarrollo de actividades antropogénicas proveniente de la lluvia, acuíferos de agua dulce, lagos y ríos no es suficiente, teniendo en cuenta que se presenta como una opción cuya disponibilidad no depende del clima y es casi ilimitada, y que puede proveer de agua más allá del ciclo hidrológico (Ayaz *et al.*, 2022). El uso del agua desalinizada para la agricultura implica varios retos, como el alto consumo y costo de la energía, el tratamiento posterior para adecuar la calidad del agua al riego y la integración de fuentes de energía renovables. Además, se necesitan más investigaciones y desarrollos para mejorar las tecnologías de desalinización existentes, como la ósmosis inversa, que presentan algunas limitaciones (Kumar *et al.*, 2017).

Es por lo anterior, que el presente trabajo pretende realizar una revisión bibliográfica relacionada a la desalinización del agua para uso en la agricultura, los costos asociados a este tipo de tecnologías, ventajas y desventajas que tiene el uso

de esta tecnología en la agricultura y los beneficios o perjuicios que pueda ocasionar en las plantas.

Objetivos

Objetivo general

Realizar una revisión de la información científica existente con respecto a las técnicas de desalinización, sus usos en cultivos y consumo humano.

Objetivos específicos

- Describir brevemente la técnica de desalinización más utilizada en Chile, sus usos en cultivos y consumo humano.
- Determinar ventajas y desventajas, basadas en la revisión bibliográfica realizada, acerca del uso de agua desalinizada en cultivos.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Capítulo I. Desafíos hídricos

1.1 Planteamiento del problema

Aproximadamente 4 mil millones de personas sufren escasez de agua al año, mientras que 2 mil millones no tienen una fuente adecuada. Esto se debe a la contaminación, sistemas de distribución ineficientes, mal manejo de los recursos hídricos y conflictos que entorpecen la distribución (UNICEF, 2021). En Chile, se vive una sequía iniciada en 2009 hasta el presente, y que reporta déficits de agua de precipitaciones desde la región de O'Higgins a Ñuble del 20 % en promedio, y de la región del Atacama a la Región Metropolitana del 50 al 100 % donde en general, la demanda de agua en el sector agrícola representa un 72,3 % del total (Chiriboga *et al.*, 2021). El costo de instalación y operación para el uso de tecnologías de desalinización es alto y transportarlas desde zonas costeras hacia el interior es poco práctico. Además, el agua debe estar balanceada en iones y se deben remover o reducir las concentraciones de sustancias que pueden resultar tóxicas para las plantas (Fluence, 2022).

1.2 Justificación

70 % de la demanda de agua a nivel mundial es para actividades agrícolas, mientras que el 21% y 9% corresponden a la industria y actividades domésticas, respectivamente. La escasez de agua ha llevado a usar agua de baja calidad para la irrigación, lo que produce impactos negativos en la producción de alimentos y en el medio ambiente (Kumar *et al.*, 2017).

Particularmente en países de alto ingreso económico, insulares pequeños con recursos hídricos limitados, como aquellos ubicados en el Medio Oriente, el Norte de África, China, Estados Unidos y algunas regiones de Europa, la desalinización se ha convertido en una técnica vital. En estos países mencionados, la desalinización de agua de mar se ha implementado con éxito para abastecer a las poblaciones locales y satisfacer la demanda de agua potable. Además de esto, la agricultura también se ha beneficiado de la desalinización. Aunque en Suramérica es menos común utilizar esta técnica para la agricultura, existen casos donde se utiliza con el propósito de irrigar cultivos en áreas donde el acceso a agua dulce es limitado (Jones *et al.*, 2019). Israel es una potencia hídrica mundial, gracias a sus cinco plantas desalinizadoras ubicadas estratégicamente, que extraen agua del Mar Mediterráneo y la procesan para hacerla potable, a pesar de que el 60 % de su territorio es desierto. Con una cultura de reciclaje, con el 85 % del líquido reutilizado para agricultura, proyectos y planificaciones (González, 2022). Existe en Atacama una planta desalinizadora, la cual es una de las más eficientes del mundo, consume $2,8 \text{ k Wh}^{-1}$ por m^3 de agua y utiliza energía limpia y renovable. Esta planta acarrea beneficios tecnológicos y ambientales. La producción de agua de esta planta es de 1.200 litros de agua potable por segundo a través de proceso de osmosis inversa, esta planta opera con energías renovables de fuentes solares y eólicas (GS Inima Environment, 2022).

1.3 Metodología

El análisis consiste en una revisión bibliográfica de la tecnología asociada a la desalinización del agua y su uso en sistemas agrícolas a nivel mundial, regional y nacional, revisión de documentación de tecnologías asociadas a esta estrategia, ventajas y desventajas a nivel económico, ambiental y sobre los cultivos, además

de la viabilidad de implementación en ecosistemas costeros y secanos.

En esta revisión bibliográfica las plataformas de búsqueda de información serán Scielo, ScienceDirect (artículos de acceso abierto) y Google académico en las cuales se logró recopilar materiales como libros, artículos y revistas científicas que tratan la problemática. Por otro lado, se utilizarán páginas web de organismos gubernamentales nacionales e internacionales como ONU, FAO, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias del Ministerio de Agricultura de Chile (INIA), entre otros.

Capítulo II. Salinidad, técnicas de desalinización y sus usos en la agricultura

2.1 Salinidad en el agua

El agua de mar es una solución salada formada por agua de mares y océanos con una alta concentración de cloruro de sodio y otros minerales (Ruiz, 2017). La salinidad de los océanos se debe a la acumulación de solutos en rocas y sedimentos. Esto también puede ser debido a actividades antropogénicas como movilización de tierras o acumulación de sales por escorrentía (Feijoó Pianto, 2018).

Según De Investigaciones Agropecuarias Centro Regional De Investigación La Cruz (2022) el agua de mar está compuesta principalmente por agua y sustancias disueltas, siendo las sales los solutos más abundantes. Los iones de sodio y cloruro representan la mayor proporción de sales en el océano. La composición química del agua de mar puede variar, pero en promedio contiene sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruro, sulfato y bicarbonato. Además, el agua de mar puede tener diferentes características físicas y químicas dependiendo de su ubicación geográfica y otros factores.

Tabla 1. Constitución de elementos del agua de mar en partes por millón.

Elementos	Composición en ppm	Elementos	Composición en ppm
Cloro	19.500	Zinc	0,00500
Sodio	10.800	Hierro	0,00340
Magnesio	1.290	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
Ion 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 componentes	0,00070

Fuente: investigaciones agropecuarias centro regional de investigación la cruz (2022).

Los tipos de agua se pueden clasificar según su nivel de salinidad. El contenido de sales influye en las propiedades físicas y químicas del tipo de agua.

Tabla 2. Tipos de agua según su salinidad (ppm)

Salinidad (ppm)	Tipo de agua	Ejemplo
0,5 – 5,0	Destilada	Agua desmineralizada
20 – 1000	Dulce	Agua potable
1000 – 10.000	Salobre	Río Loa
10.000 – 40.000	Salada	Océano
50.000 – 150.000	Salmuera	Mezcla para encurtidos
>150.000	Hipersalina	Mar Muerto

Fuente: investigaciones agropecuarias centro regional de investigación la cruz (2022).

2.2 Desalinización del agua

Los procesos de desalinización tienen como objetivo tratar aguas salobres o saladas para producir agua con una concentración de sal reducida, generando dos tipos de agua: producto purificado con cantidad de sales mínima, y producto concentrado o

rechazo con los solutos separados (Saavedra *et al.*, 2022). Los sistemas de desalinización ofrecen varios beneficios, como el aumento de agua de calidad para regar cultivos, fuentes alternas de agua durante periodos de sequía, reducción de la necesidad de importar agua, protección a la salud y disminución de la salinidad del agua para riego, contribuyendo con la solución de la escasez de agua a nivel mundial (Ruiz, 2017).

En Chile los métodos de desalinización más utilizados son la destilación instantánea en múltiples etapas (MSF), la destilación multiefectos (MED) y la ósmosis inversa (RO). La desalinización por ósmosis inversa para la agricultura ha demostrado mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos, al eliminar las sales que causan estrés salino. También optimiza el uso del agua, al aplicar métodos de riego más eficientes. Sin embargo, el agua desalinizada puede tener efectos negativos en el suelo y los cultivos, como la fitotoxicidad y la sodificación, y requiere altos costos de producción y tratamiento. Además, el agua desalinizada necesita ser remineralizada o mezclada con agua no tratada para evitar deficiencias nutricionales en las plantas (De Investigaciones Agropecuarias Centro Regional De Investigación La Cruz, 2022).

2.3 Tipos de procesos de desalinización del agua más utilizados

La destilación instantánea en múltiples etapas (MSF), la destilación multiefectos (MED) y la ósmosis inversa (RO) son tecnologías ampliamente utilizadas a nivel mundial debido a su eficiencia y disponibilidad comercial. La destilación instantánea en múltiples etapas es económica para grandes volúmenes, pero tiene una alta demanda de energía. La destilación multiefectos es adecuada para eliminar la alta concentración de sal y es más apropiada cuando hay una fuente de calor residual disponible o el costo de la energía es bajo. La ósmosis inversa es adecuada para el tratamiento del agua salada, tiene un bajo consumo de energía en comparación con los procesos térmicos y es comercialmente disponible (Baeza y Harris, 2019).

2.3.1 Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)

Los procesos de desalinización térmica abarcan el 28 % de las operaciones globales de desalinización, de los cuales el 21 % corresponde al Proceso de Evaporación Instantánea Multietapa. Esto involucra un ingreso de calor con vapor para llevar el

agua salada a una temperatura de entre 90 y 110 °C, seguido de recuperación de calor y una etapa de rechazo de calor. Estas tres etapas permiten la generación de vapor para remover la energía de la masa de agua salada, enfriarla y condensarla para obtener agua desalada (Toth, 2020).

2.3.2 Destilación multiefectos (MED)

La destilación multiefectos es un proceso térmico para desalinizar agua mediante una serie de etapas con un gradiente de presión decreciente. Utiliza fuentes de calor para elevar la temperatura hasta los 100 grados Celsius en la primera etapa, generando un vapor que es transferido a las etapas siguientes para evaporar el agua. Tiene una capacidad de desalinización de media a alta, y los vapores generados son condensados. La mayoría de los sistemas están diseñados para operar de manera autónoma, con producciones entre 600 y 30.000 m³ al día (Feria-Díaz *et al.*, 2021). La tecnología ha sido considerada para uso en irrigación agrícola, pero es un proceso de energía intensiva, su consumo está entre 15 - 22 kWh m⁻³ debido a la pérdida de eficiencia en el cambio de fases (Daghari, 2021).

2.3.3 Compresión mecánica de vapor (CV)

La Compresión Mecánica de Vapor es un método de desalinización que aprovecha el calor latente generado por el vapor de agua para producir agua destilada. Requiere poco calor externo y puede tener una recuperación del agua destilada entre el 90 % y 95 %. Esta técnica se emplea en conjunto con otro tipo de tratamientos para incrementar la eficiencia de la energía. Algunas plantas híbridas con compresores de vapor y destilación de membrana han reportado eficiencias muy altas con un poder eléctrico de 3.31 kWh m⁻³ (Wang *et al.*, 2021).

2.3.4 Desalinización por membrana (MD)

Existen membranas para separar sólidos, solutos y agua en sistemas de irrigación con agua salobre o salada. Estas membranas usan difusión y ultrafiltración para incrementar el flujo y separar el agua de la sal y otros minerales (Brant y Harvey, 2017).

2.3.5 Electrodialisis (ED)

La electrodialisis es un proceso de separación selectiva de sales del agua dulce aplicando un voltaje directo. Los iones con carga positiva migran hacia el electrodo

con carga negativa, y viceversa, lo que permite desalinizar el agua. Los aniones pueden atravesar una membrana selectiva de aniones, y los cationes una de cationes, quedando atrapados en el agua residual o salmuera (Claudio, 2018).

Una forma eficiente de purificar el agua residual es la electrodiálisis, que elimina casi todo el sodio en menos de dos horas. Esta tecnología tiene un alto potencial para mejorar la calidad del agua y reducir el impacto ambiental de los desechos líquidos. Los mejores resultados de remoción de sales se obtienen con un potencial eléctrico entre 65 y 80 Voltios por un periodo de 40 minutos (Abou-Shady, 2017).

2.3.6 Ósmosis reversa (RO)

La Ósmosis Reversa es el método más eficiente para producir agua potable. Se basa en una unidad de membrana compuesta por membranas semipermeables que separan los solutos del agua. La presión de 55 a 70 bar es aplicada sobre la membrana, permitiendo el transporte selectivo del agua sobre los solutos. La energía consumida por las bombas de alta presión es la más alta en este proceso (Lim *et al.*, 2021).

Tabla 3 Valores de agua desalinizada por proceso de osmosis reversa (RO) y valor considerado adecuado para cada parámetro.

Parámetro	Unidad	Agua desalinizada (RO)	Valor adecuado
pH	-	6,63	-
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0,14	<0,75
Relación de adsorción de sodio	-	0,73	<3,00
Sodio porcentual	%	59,7	-
Dureza	mg L ⁻¹	23,0	-
Calcio	mg L ⁻¹	7	<200
Magnesio	mg L ⁻¹	1	<200
Potasio	mg L ⁻¹	1	-
Sodio	mg L ⁻¹	16	<115
Cloruro	mg L ⁻¹	21,0	<142

Sulfato	mg L ⁻¹	7	<960
Bicarbonato	mg L ⁻¹	23	-
N-amoniacal	mg L ⁻¹	0,77	<5,00
N-nítrico	mg L ⁻¹	4,00	-
Fósforo	mg L ⁻¹	0,07	-
Boro	mg L ⁻¹	0,12	<0,50
Cobre	mg L ⁻¹	<0,01	-
Hierro	mg L ⁻¹	<0,01	-
Manganeso	mg L ⁻¹	0,03	-
Zinc	mg L ⁻¹	<0,01	-

Fuente: (Saavedra *et al.*, 2022)

2.3.7 Nanofiltración (NF)

La nanofiltración (NF) es una tecnología de desalación que utiliza membranas poliméricas semipermeables microporosas. A diferencia de la osmosis inversa, la NF tiene una selectividad menor, pero puede eliminar hasta el 98% de iones divalentes como los sulfatos y menos del 50% de iones monovalentes como el cloruro de sodio. La NF opera a presiones de 10 a 15 bar para aguas salobres y utiliza menos del 50% de la energía requerida en la osmosis inversa debido a la menor presión osmótica (Saavedra *et al.*, 2022).

2.4 Comparación entre método por membranas y por evaporación

La desalinización por membranas puede ser más eficiente energéticamente y puede producir agua con menor salinidad, pero puede tener problemas de obstrucción y degradación de las membranas. La desalinización por evaporación puede ser más resistente a estos problemas, pero puede consumir más energía y producir agua con mayor salinidad (Saavedra *et al.*, 2022).

2.5 Uso de agua desalinizada en cultivos

En Chile, el método de desalinización por membranas más utilizado es la osmosis reversa. La osmosis reversa se emplea tanto en el riego de arándanos con agua desalada como en el riego de paltos con agua procesada por osmosis reversa. Además, se utiliza en la desalinización de agua salobre subterránea en el valle de Arava, mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos para disminuir los costos de producción. De este método se obtiene agua purificada, siendo el consumo

energético de las bombas de osmosis reversa un factor importante en el costo de operación (Saavedra *et al.*, 2022).

La calidad del agua para el riego debe cumplir con parámetros como pH, dureza, alcalinidad, salinidad y equilibrio entre magnesio y calcio (Beltrano y Gimenez, 2015). La tecnología OR pueden reducir la salinidad de las aguas salobres, pero estas tecnologías también pueden disminuir la cantidad de minerales necesarios para el crecimiento de las plantas. Para abordar este problema, se están proponiendo nuevas tecnologías que permitan remover preferentemente los iones monovalentes como el sodio y el cloruro (Tsygurina *et al.*, 2022).

Según González (2022) el agua desalinizada es utilizada en varios países como fuente de riego, destacándose Chile e Israel por el desarrollo y empleo de aguas desalinizadas en la agricultura. Las condiciones que determinan la calidad del agua dependerán de los siguientes puntos:

- Físicas: problemas originados por sólidos en suspensión, que producen problemas y sedimentación en obstrucción de goteros, que a pesar de no ser graves se solucionan con distintos filtros ubicados en los cabezales de riego.
- Biológicas: problemas causados por distintos agentes patógenos como nematodos y bacterias.
- Químicas: problemas originados por la calidad y cantidad de sales disueltas en el agua.

El uso de agua desalinizada por osmosis inversa se puede utilizar para el riego de diversos cultivos agrícolas como palto, frutales de nuez, naranjo, durazno, lenteja, poroto, maíz, arveja, zanahoria, lechuga, cebolla, tomate, trigo, alfalfa y betarraga.

El agua desalinizada puede ser una solución para zonas con escasez de agua dulce, pero también puede presentar problemas como la salinidad residual, la sodificación del suelo, la deficiencia de nutrientes y el alto costo de producción. Por eso, se requiere un diseño e implementación cuidadosos de la planta de desalación y un manejo adecuado del riego y la fertilización (Saavedra *et al.*, 2022).

Tabla 4 Valores de sensibilidad de algunos cultivos en relación con el sodio intercambiable.

Sensibilidad	Cultivos
Cultivos sensibles al sodio intercambiable.	Palto Frutales de nuez Naranja Durazno Lenteja Poroto Maíz Arveja
Cultivos semi tolerantes al sodio intercambiable.	Cebolla Tomate Trigo Lechuga Zanahoria
Cultivos tolerantes al sodio intercambiable.	Alfalfa Betarraga

Fuente: (Saavedra *et al.*, 2022)

Antolinos *et al.* (2020) realizaron un estudio que comparó el uso de agua desalinizada y agua de pozo para el riego de tomates hidropónicos y su impacto en la calidad del producto. Los resultados mostraron que el agua desalinizada no afectó negativamente la calidad sensorial ni la aceptación de los consumidores, y que incluso pudo mejorar el contenido antioxidante de los tomates. Por lo tanto, el agua desalinizada se puede utilizar como una alternativa viable y de bajo costo para el riego hidropónico, siempre que se combine con recursos hídricos convencionales.

En un estudio realizado en el sureste de Gran Canaria, se identificaron riesgos potenciales de degradación del suelo relacionados con el riego de agua desalinizada. Para mitigar estos riesgos, se recomiendan cuatro buenas prácticas locales: aplicación de enmiendas de calcio y orgánicas, fracciones de lixiviación adecuadas, uso de fertilización orgánica y participación de los agricultores (Monterrey-Viña *et al.*, 2020)

Según otro estudio realizado en la ciudad de México se demostró que la desalación por ósmosis inversa puede ser una solución efectiva para el abastecimiento de agua dulce en la agricultura, siempre y cuando se implementen

medidas adecuadas para minimizar los impactos ambientales (Dévora-Isiordia *et al.*, 2016).

Un ensayo realizado por Arroyo y Fernández (2018) examina las ventajas del riego con agua desalinizada para la industria agrícola costera chilena. Los autores llegan a la conclusión de que el riego con agua desalinizada es una opción viable para aumentar la cantidad de agua disponible para el riego, reducir la presión sobre los recursos hídricos disponibles y mejorar la eficiencia del riego. Sin embargo, los altos costos de la desalinización, la infraestructura limitada para el transporte y distribución del agua desalinizada y la compleja legislación chilena sobre el agua desalinizada requieren más investigación y desarrollo.

Según un estudio de Fabian de Garcia Science Center en los Estados Unidos, el uso de agua desalinizada reduce la cantidad de sal presente en el suelo y el agua de riego, lo que reduce el estrés hídrico y salino que experimentan las plantas y mejora su crecimiento y rendimiento (Ben Ali *et al.*, 2022). Además, un estudio evaluó el impacto de diferentes tratamientos de riego en las propiedades químicas del suelo y la producción de biomasa de alfalfa en suelos salino-sódicos y salinos de las Islas Canarias. Los resultados mostraron que el contenido de salinidad del suelo disminuyó significativamente con el tiempo, independientemente del tratamiento aplicado. Además, se observó un aumento en los niveles de sodio intercambiable y una reducción en los niveles de potasio intercambiable en el suelo.

En cuanto a la producción de biomasa, se encontró que las variedades de alfalfa mostraron una reducción en la producción a medida que aumentaba la salinidad del agua de riego. Sin embargo, todas las variedades de alfalfa mantuvieron una calidad nutricional óptima. En general, se concluye que la alfalfa puede tolerar niveles moderados de salinidad en el agua de riego sin afectar significativamente su calidad y producción de biomasa (Díaz *et al.*, 2018).

2.6 Calidad de agua desalinizada para el consumo humano en Chile

Se estableció normas para la calidad del agua apta para el consumo humano. Estas incluyen parámetros para la gestión y los aspectos químicos. Estas medidas son fundamentales para mejorar la salud y el desarrollo. Estas deben asegurar que el agua sea inocua y se apliquen barreras para evitar su contaminación (Radiation and

health, 2011). Existen regulaciones internacionales sobre la calidad de las aguas, basadas en parámetros como el color, temperatura, olor, sabor, pH, turbidez, contenido de aluminio, mercurio, hierro, cobre, fluoruro, nitritos y nitratos (Organización de las Naciones Unidas, 2020).

Según una investigación que evaluó la calidad y la percepción del agua potable en Antofagasta, una ciudad que usa agua desalinizada, agua de cordillera y agua mezclada. Se determinó que el agua desalinizada tiene una mala evaluación, tanto por el servicio como por el olor y el sabor, debido a experiencias anteriores. También la investigación señala que el agua de cordillera es la mejor valorada, seguida por el agua mezclada. En general se concluye que hay una insatisfacción general con el servicio de agua potable y que falta reconocimiento y normativa para el consumo de agua desalinizada (Fragkou *et al.*, 2023).

Tabla 5. Evaluación del servicio de abastecimiento y características organolépticas del agua potable según zona hídrica en la ciudad de Antofagasta.

Aspecto evaluado		Zona hídrica			Ciudad
		Agua desalinizada	Agua mezclada	Agua cordillerana	
Evaluación Servicio	Continuidad	5,1	5,3	5,5	5,2
	Presión	4,4	4,9	5,1	4,8
	Calidad general agua	3,4	3,4	3,6	3,5
	Sabor	2,7	2,6	2,9	2,8
Aspectos organolépticos	Olor	3,9	3,7	4,2	3,9
	Transparencia	4,3	4,1	4,5	4,2
	Cantidad de sarro	3,7	3,3	3,4	3,5
Promedio		3,9	3,9	4,2	4,0

Fuente: (Fragkou *et al.*, 2023)

2.7 Ventajas y desventajas

Es importante considerar estas ventajas y desventajas al evaluar la viabilidad y conveniencia de utilizar la desalación del agua en la agricultura. Cada caso debe ser analizado de manera individual, teniendo en cuenta factores técnicos, económicos y ambientales (Saavedra *et al.*, 2022).

Tabla 6. Comparación entre las ventajas y desventajas de la desalación del agua de mar y sus usos en la agricultura.

Ventajas	Desventajas
Ahorro de agua: La desalación del agua permite utilizar fuentes de agua salada o salobre que no son aptas para el riego tradicional, lo que ayuda a conservar el agua dulce disponible.	Costos elevados: La desalación del agua es un proceso costoso, tanto en términos de inversión inicial como de operación y mantenimiento. Esto puede limitar su viabilidad económica para algunos agricultores.
Control preciso de nutrientes: Mediante la desalación, se puede ajustar y controlar de manera precisa las necesidades de las plantas en términos de nutrientes, lo que favorece un crecimiento óptimo de los cultivos.	Impacto ambiental: La desalación del agua puede tener un impacto negativo en el medio ambiente, especialmente si no se gestionan adecuadamente los subproductos y residuos generados durante el proceso.
Reducción de agroquímicos: Al utilizar agua desalada, se elimina la necesidad de utilizar agroquímicos como fertilizantes, lo que contribuye a una agricultura más sostenible.	Problemas de fitotoxicidad y desequilibrio nutricional: El agua desalada puede contener altas concentraciones de sodio y bajos niveles de calcio, magnesio y otros nutrientes esenciales para los cultivos. Esto puede provocar problemas de fitotoxicidad y desequilibrios nutricionales en las plantas si no se toman medidas adecuadas.

Fuente: (Saavedra *et al.*, 2022).

3.CONCLUSIÓN

Tras la investigación, podemos deducir lo siguiente:

1. Las técnicas de desalinización son una solución práctica para abordar los desafíos relacionados con el crecimiento de la población, el cambio climático y el acceso a las fuentes de agua.
2. La desalinización tiene el potencial de abordar los problemas de escasez de agua y contribuir al desarrollo sostenible en la agricultura.
3. Es importante considerar los costos, el consumo de energía y los avances tecnológicos para maximizar los beneficios de la desalinización.

REFERENCIAS

1. Abou-Shady, A. (2017). "Recycling of polluted wastewater for agriculture purpose using electrodialysis: Perspective for large scale application." *Chemical Engineering Journal*, 1- 18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.083>
2. Antolinos, V., Sánchez-Martínez, M. J., Maestre-Valero, J. F., López-Gómez, A., y Martínez-Hernández, G. B. (2020). Effects of Irrigation with Desalinated Seawater and Hydroponic System on Tomato Quality. *Water*, 12(2), 518. doi:10.3390/w12020518
3. Arroyo, J., y Fernández, E. (2018). Riego con agua desalinizada: una alternativa para el sector agrícola costero chileno. *Revista de Geografía Agrícola*, 54(1), 7-20.
4. Ayaz, M., Namazi, M. A., Ammad ud Din, M., Mohamed Ershath, M. I., Mansour, A., y Aggoune, H. M. (2022). ("Mohammad Ammad - Google Scholar") Desalination (540). doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116022>
5. Baeza, E., y Harris, P. (2019). La desalinización de agua de mar: tecnologías, regulaciones y ambientales. Bcn.cl. Recuperado el 14 de septiembre de 2023, de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27769/2/Informe_Aspectos_Principales_de_Desalacion.pdf
6. Ben Ali, A. R., Shukla, M. K., Marsalis, M., y Khan, N. (2022). Irrigation with desalinated and raw produced waters: Effects on soil properties, and germination and growth of five forages. *Agricultural Water Management*, 274(107966), 107966. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107966>
7. Beltrano, J., y Gimenez, D. (2015). Cultivo en hidroponía. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1
8. Brant, J. A., y Harvey, K. (2017). Desalination membranes for subsurface irrigation. Estados Unidos. Obtenido de <https://patentimages.storage.googleapis.com/c1/5e/29/0cf6a00396dc12/US20170150685A1.pdf>
9. Chiriboga, H., Fuenzalida, P., Meza, F., Radic, I., y Moreira de Souza, R. (2021).

Seguridad Hídrica. Desalinización del agua, nueva fuente para el riego agrícola. Santiago de Chile: Castro, R. Obtenido de <https://www.iica.int/sites/default/files/2021-01/DESALINIZACION%20DE%20AGUA-NUEVA%20FUENTE%20PARA%20EL%20RIEGO%20AGRICOLA-IICA-INIA%20%281%29.pdf>

10. Claudio, O. G. (2018). Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable. Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
11. Daghari, I. (2021). Desalination and Agriculture. En Shahzad, M. W., Dixon, M., Barassi, G., Xu, B. B. y Jiang, Y. Pathways and Challenges fo Efficient Desalination. doi:<https://doi.org/10.5772/intechopen.100197>
12. De Investigaciones Agropecuarias Centro Regional De Investigación La Cruz, I. (2022). "Manual técnico de desalación y purificación de aguas mediante osmosis inversa." <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/68622>
13. Dévora-Isiordia, G. E., López-Mercado, M. E., Fimbres-Weihs, G. A., Álvarez-Sánchez, J., y Astorga-Trejo, S. (2016). Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(3), 155–169. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353546192009>
14. Díaz, F. J., Grattan, S. R., Reyes, J. A., de la Roza-Delgado, B., Benes, S. E., Jiménez, C., Dorta, M., y Tejedor, M. (2018). Using saline soil and marginal quality water to produce alfalfa in arid climates. *Agricultural Water Management*, 199, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.003>
15. Feijoó Pianto, B. K. (2018). Efecto de niveles de salinidad del agua de riego en suelo franco arenoso en el cultivo del rabanito (*Raphanus sativus*). Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3581>
16. Feria-Díaz, J. J., López-Méndez, M. C., Rodríguez-Miranda, J. P., Sandoval-Herazo, L. C., y Correa-Mahecha, F. (2021). "Commercial Thermal Technologies for Desalination of Water from Renewable Energies: A State of the Art Review." ("Processes | Free Full-Text | Commercial Thermal Technologies for ... - MDPI") *Processes*, 9(2). doi:<https://doi.org/10.3390/pr9020262>

17. Fragkou, M. C., Monsalve, T., Contreras, M. A., y Crisóstomo, J. R. (2023). "“Nosotros tomamos agua de mar” Injusticias hídricas asociadas al agua desalinizada para consumo humano en la ciudad de Antofagasta. PLANEÓ, 45. <https://doi.org/10.7764/plan.045.092>

18. Fluence. (2022). Desalination and Agriculture: Lessons from Spain. Obtenido de <https://www.fluencecorp.com/desalination-and-agriculture-lessons-from-spain/>

19. González, A. (2022). Así ocurre el “milagro del agua” en Israel. Obtenido de Reportajes especiales: <https://oncenoticias.digital/reportajes-especiales/asi-ocurre-el-milagro-del-agua-en-israel/93724/#:~:text=El%20milagro%20del%20agua%20en,en%20sitios%20estrat%C3%A9gicos%20del%20pa%C3%ADs.>

20. GS Inima Environment. (2022). "Inaugurada la planta desaladora más grande para consumo humano en Chile, construida por Inima-CVV." Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/gs-inima-environment/inaugurada-planta-desaladora-mas-grande-consumo-humano-chile>

21. Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M. T., Smakhtin, V., y Kang, S. (2019). "The state of desalination and brine production: A global outlook." *Science of The Total Environment*, 657, 1343–1356.

22. Kumar, R., Ahmed, M., Bhadrachari, G., y Thomas, J. P. (2017). Desalination for agriculture: water quality and plant chemistry, technologies and challenges. *Water Science and Technology: Water Supply*, 1505 – 1517. doi:<https://doi.org/10.2166/ws.2017.229>

23. Lim, Y. J., Goh, K., Kurihara, M., y Wang, R. (2021). Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication – A review. *Journal of Membrane Science*, 629. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119292>

24. Monterrey-Viña, A., Musicki-Savic, A., Díaz-Peña, F. J., y Peñate-Suárez, B. (2020). Technical and Agronomical Assessment of the Use of Desalinated Seawater for Coastal Irrigation in an Insular Context. *Water*, 12(1), 272. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12010272>

25. Organización de las Naciones Unidas. (2020). Cambios demográficos. Obtenido de <https://www.un.org/es/un75/shifting-demographics#:~:text=Se%20espera%20que%20la%20poblaci%C3%B3n,d isminuyendo%20la%20tasa%20de%20fecundidad.>

26. Programme, U. W. W. A. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático. UNESCO Publishing.
27. Radiation and health. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. www.who.int.
<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
28. Ruiz, S. (2017). La Desalinización de Agua de Mar para Riego Agrícola de Cultivos Hortícolas. Serie Agua y Riego Núm. 17. Obtenido de Artículos Técnicos de INTAGRI: <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/la-desalinizacion-de-agua-de-mar-para-riego>
29. Saavedra, A.; Valdés, H.; Zúñiga, C.. (2022). Manual técnico de desalación y purificación de aguas mediante ósmosis inversa. Boletín INIA N° 462. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación La Cruz, La Cruz, Chile.
30. Toth, A. J. (2020). "Modelling and Optimisation of Multi-Stage Flash Distillation and Reverse Osmosis for Desalination of Saline Process Wastewater Sources." *Membranes*, 265, 10(10).
doi:<https://doi.org/10.3390/membranes10100265>
31. Tsygurina, K., Sarapulova, V., Kirichenko, E., y Kirichenko, K. (2022). "Monovalent selective membrane for electrodialysis desalination of water for agriculture." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 996.
doi:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/996/1/012019>
32. UNICEF. (2021). Water Scarcity. Obtenido de UNICEF for every child: <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>
33. Wang, Y., Qiu, B., Xiao, Z., Liu, J., Fan, S., y Tang, X. (2021). Hybrid desalination system of mechanical vapor recompression based on membrane distillation. *Membrane and Water Treatment*, 12(3), 115–123.
doi:<https://doi.org/10.12989/MWT.2021.12.3.115>