



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# Impacto de la descarga de salmuera en bahías semicerradas: Caso de estudio Bahía Herradura de Guayacán

Vicente Nilo Mann

PROFESOR(ES) GUÍA: JOSE LUIZ SALAZAR, PhD  
HÉCTOR VALDÉS GONZÁLEZ, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

SANTIAGO – CHILE  
2020



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# Impacto de la descarga de salmuera en bahías semicerradas: Caso de estudio Bahía Herradura de Guayacán

POR: VICENTE NILO MANN

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESORES GUIA:** José Luis Salazar, PhD y Héctor Valdés-González, PhD

**PROFESOR INTEGRANTE 1:** Cristian Palma Infante

**PROFESOR INTEGRANTE 2:** Lorenzo Reyes Bozo, PhD

**PROFESOR INTEGRANTE 3:**

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y de  
Sistemas.

Diciembre, 2020

Santiago, Chile

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado:

**Impacto de la descarga de salmuera en bahías semicerradas: Caso de estudio Bahía Herradura de Guayacán**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría (o co-autoría) y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.



VICENTE NILO MANN

Firma

*Dedicado a mis padres, quienes siempre se preocuparon de mantener en mí la motivación por adquirir nuevos conocimientos y me alentaron a seguir adelante cuando el camino era cuesta arriba.*

**Vicente Nilo Mann**

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, deseo agradecer a don Héctor Valdés, Director de Postgrados y Educación Continua de la Facultad de Ingeniería, profesor guía en este proyecto, por la oportunidad de trabajar bajo su tutela, donde porto todos sus conocimientos y dedicación a mi favor, generando instancias fundamentales de trabajo y reflexión, sin las cuales definitivamente no hubiese conseguido los mismos resultados.

Expreso mi enorme gratitud a todos los docentes con los que tuve la oportunidad de compartir en el aula de clases, por la gran labor que realizan día a día para transmitir sus conocimientos y experiencia a nosotros, los alumnos. Sin duda el equipo docente de la universidad posee un nivel académico, profesional y humano extraordinario, el cual se refleja en la gran dedicación que han puesto para entregarnos conocimientos y herramientas esenciales para nuestro desarrollo profesional.

Agradezco al equipo directivo y personal de la universidad, por facilitarme todas las herramientas y materiales necesarios para cursar este magister y para la preparación de este proyecto.

Agradezco a mis compañeros, con quienes compartí innumerables horas de clases, jornadas de estudio e instancias de reflexión. Si bien llegamos por caminos separados, todos se presentaron como aliados para completar este desafío en conjunto, y espero de todo corazón podamos seguir compartiendo conocimientos, experiencias y momentos recreativos en el futuro.

Sin duda proponerme la meta de realizar un magister ha requerido un enorme esfuerzo y tiempo en los últimos años de mi vida. No podría haberlo logrado sin el apoyo incondicional de mi familia y amigos, los cuales siempre han estado para alentarme en los momentos más difíciles.

Vicente Nilo Mann

# Impacto de la descarga de salmuera en bahías semicerradas: Caso de estudio Bahía Herradura de Guayacán

Vicente Nilo Mann

Bajo la supervisión de los Profesores José Luis Salazar, PhD y Héctor Valdés González, PhD, en la Universidad del Desarrollo de Chile

## *Resumen*

Este trabajo presenta las principales problemáticas asociadas desde la perspectiva ambiental, propias de la implementación del proceso de desalinización de agua marina como solución al problema de escasez hídrica. El objetivo de este trabajo es analizar el cambio en la salinidad de las aguas de la bahía Herradura de Guayacán, en base a diversas condiciones simuladas de descarga de salmuera directa en su costa. Para llevarlo a cabo, se emplea una aproximación cuantitativa, que considera las condiciones topográficas y oceanográficas de la bahía Herradura de Guayacán, en conjunto con un modelo matemático para calcular el aumento en la salinidad relativa de sus costas. El estudio muestra que la producción de agua potable por medio de la desalación podría ocasionar un aumento de hasta un 40.7% en la salinidad de las costas en la Bahía de La Herradura ubicada en la Región de Coquimbo al instalar un proyecto de desalación equivalente a 250.000 metros cúbicos por año. Este estudio concluye que, las principales variables a considerar para instalar una planta desaladora en esta zona son la capacidad de producción, la ubicación de la descarga de residuos y la capacidad de monitoreo del ecosistema marino adyacente.

Palabras clave: Agua Potable; Escasez Hídrica; Desalación del Agua; Impacto Ambiental; Salmuera.

## HIGHLIGHTS

# Impacto de la descarga de salmuera en bahías semicerradas: Caso de estudio Bahía Herradura de Guayacán

Vicente Nilo Mann

- Se estima el aumento de la salinidad debido a la instalación de una desaladora.
- Se utiliza una aproximación cuantitativa a través de un modelo matemático.
- Se analizan dos casos: plantas para consumo urbano e industrial.
- Los resultados revelan aumentos potencialmente dañinos en la salinidad del mar.
- No es factible en termino ambiental instalar una desaladora en bahías semicerradas.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1	FACTIBILIDAD AMBIENTAL DE INSTALAR UNA PLANTA DESALADORA EN LA BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN. ....	10
1.2	BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA .....	11
1.3	CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO .....	16
1.4	OBJETIVO GENERAL.....	16
1.4.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
•	ESTUDIAR LAS CONDICIONES TOPOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS DE LA BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN.....	17
•	MODELAR LOS FLUJOS DE AGUA Y SALMUERA CORRESPONDIENTES A LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DESALADORA EN LA BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN.....	17
•	ANALIZAR EL AUMENTO EN LA SALINIDAD RELATIVA DE LAS COSTAS DE ESTA BAHÍA.....	17
1.5	PROPUESTA METODOLÓGICA .....	17
1.6	ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTE TRABAJO .....	19
<b>2</b>	<b>INFORMACIÓN Y RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
2.1	PROCEDIMIENTO DE RECOGIDA Y ANÁLISIS DE DATOS .....	20
2.2	RESULTADOS.....	21
<b>3</b>	<b>ARTÍCULO .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>37</b>
4.1	PROPUESTA PARA TRABAJOS FUTUROS .....	38
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>ANEXO: REPORTE DE PLAGIO.....</b>	<b>42</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>ILUSTRACIÓN 1: GEOMETRÍA CON AUMENTO DE ANCHO EN FORMA DE RAÍZ CUADRADA, PENDIENTE UNIFORME Y SECCIÓN TRANSVERSAL PARABÓLICA. ....</i>	<i>17</i>
<i>ILUSTRACIÓN 2: LOGARITMO DE SALINIDAD RELATIVA EN BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN DEBIDO A UNA PLANTA DESALADORA CON <math>Q=0.083</math> EN <math>A/L=0.5</math> PARA <math>0 &lt; x &lt; 30</math>. ....</i>	<i>22</i>
<i>ILUSTRACIÓN 3: LOGARITMO DE SALINIDAD RELATIVA EN BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN DEBIDO A UNA PLANTA DESALADORA CON <math>Q=0.083</math> EN <math>A/L=0.5</math> PARA <math>30 &lt; x &lt; 60</math>. ....</i>	<i>22</i>
<i>ILUSTRACIÓN 4: LOGARITMO DE SALINIDAD RELATIVA EN BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN DEBIDO A UNA PLANTA DESALADORA CON <math>Q=9.26</math> EN <math>A/L=0.5</math> PARA <math>0 &lt; x &lt; 30</math>. ....</i>	<i>23</i>
<i>ILUSTRACIÓN 5: LOGARITMO DE SALINIDAD RELATIVA EN BAHÍA HERRADURA DE GUAYACÁN DEBIDO A UNA PLANTA DESALADORA CON <math>Q=9.26</math> EN <math>A/L=0.5</math> PARA <math>30 &lt; x &lt; 60</math>. ....</i>	<i>23</i>

## 1 INTRODUCCIÓN

El agua es descrita como el recurso natural más importante y la base de toda forma de vida. Este recurso puede ser considerado como renovable, siempre y cuando se controle cuidadosamente su uso, tratamiento, liberación y circulación. Si bien este es el elemento más abundante del planeta, aproximadamente el 97% es agua salina, no apta para el consumo humano, y del 3% restante alrededor de dos terceras partes se encuentra congelada en glaciares y casquetes helados. Si bien este recurso puede considerarse como renovable, la disponibilidad de agua fresca está disminuyendo de manera constante y en muchas partes del mundo la demanda excede la capacidad de abastecimiento. En la actualidad, Chile se encuentra en el periodo más extenso de sequía desde que existen registros, y existen diversas zonas a lo largo del país que no cuentan con abastecimiento de agua potable de forma regular, teniendo que someterse a planes de contingencia para conseguir este recurso vital. Las proyecciones aseguran que el agua se acabara incluso en la Región Metropolitana en el corto plazo. En el 2019, el déficit de precipitaciones fue más agudo que cualquier escenario proyectado, y la Dirección General de Aguas declaró que alrededor de 10 embalses se encuentran en niveles críticos. Bajo este escenario, la búsqueda de nuevas soluciones para enfrentar este problema nos lleva a pensar en la posibilidad de masificar la producción de agua potable a través del proceso de desalinización de agua de mar. A nivel mundial, en la actualidad se producen más de 200 millones de m<sup>3</sup>/día de agua desalada, esto gracias a la operación de alrededor de 20.000 plantas desaladoras. Si bien este proceso está en auge en la última década, existen barreras que impiden su masificación. Uno de los principales problemas es el gran gasto energético que se requiere para la operación de una planta, y, por otra parte, el daño al medio ambiente que estas pueden generar debido a la emisión de gases invernadero y el daño que pueden generar las descargas de salmuera al ecosistema marino. Mediante el proceso de Osmosis Inversa, la tecnología más utilizada para la desalación, cerca de un 50% del agua de mar es convertida en agua potable, y el resto es devuelto al mar en forma de salmuera, un líquido con concentración de sales considerablemente mayor a la salinidad del mar. En el mundo, se genera alrededor de 141 millones de metros cúbicos de salmuera al día, los cuales no tienen otro destino que el mar.

## **Escasez hídrica en la Región de Coquimbo**

La región de Coquimbo ha experimentado por más de una década una situación de sequía tan grave que ha llegado a poner en gran riesgo a sectores productivos, a la agricultura y el consumo humano de agua potable, donde todavía quedan rezagos, sobre todo en el secano, manteniéndose la declaración de escasez hídrica en 14 comunas. Un estudio realizado por la Fundación Chile señala que a nivel nacional existen 9 cuencas que se encuentran en una situación de riesgo alto. De ellas, 4 corresponden a la región de Coquimbo. A eso se suma además que la zona es donde más se ha intensificado la reducción de precipitaciones y las aguas subterráneas también han visto mermada su capacidad. Las principales cuencas de la Región de Coquimbo presentan los índices más bajos de oferta Hídrica: río Los Choros (0.01 m<sup>3</sup>/s), cuencas costeras entre río Choapa y río Quilimarí (0.16 m<sup>3</sup>/s) y río Quilimarí (0.23 m<sup>3</sup>/s). Además, estas cuencas presentan el mayor índice de Brecha Hídrica.

## **Bahía Herradura de Guayacán**

La Bahía Herradura de Guayacán se encuentra ubicada a 15 km de la ciudad de La Serena, en la Región de Coquimbo, y presenta una superficie de 3,3 kilómetros cuadrados, y un ancho en su extremo más angosto de 800 metros. No existen caudales significativos de agua dulce que desemboquen en ella. Su profundidad media es de 19 metros, alcanzado una profundidad de 60 metros en la boca. Se estima que el promedio de salinidad superficial de sus aguas es de 34,85 ppt y 34,52 ppt en el fondo.

### **1.1 Factibilidad ambiental de instalar una planta desaladora en la bahía Herradura de Guayacán.**

Entendida esta realidad, es posible efectuar el siguiente cuestionamiento de contexto: ¿Cuál es el impacto, en términos ambientales, de emplazar una o más plantas desaladoras de agua que viertan sus residuos en la bahía Herradura de Guayacán?

En efecto, la implementación de plantas desaladoras en esta y otras zonas con problemas de escasez hídrica parece una realidad para el futuro próximo, y será necesario considerar y estudiar en profundidad las implicancias que esto puede traer al ecosistema marino, ya que cualquier solución no debe ir en desmedro de nuestro medio ambiente.

## **1.2 Breve discusión de la literatura**

El agua es el recurso natural con mayor presencia en nuestro planeta, cubriendo alrededor del 70% de la superficie terrestre. Sin embargo, solo el 2.5% se denomina aguas frescas, las cuales provienen de ríos, lagos y acuíferos, y tan solo el 0.62% es apta para el consumo humano, industrial y agrícola. Sumado a esto, actualmente presenciamos globalmente altos niveles de estrés hídrico a causa de las sequías provenientes del cambio climático, convirtiendo al agua dulce en un bien muy escaso. Las sequías se establecen cuando existe un déficit respecto al registro histórico de precipitación y/o caudal de ríos. En Chile, la sequía que se observa entre la región de Coquimbo y Los Lagos está presente desde el año 2009, siendo la mayor sequía registrada en las últimas décadas, pasando así a denominarse “mega sequía” [Garreaud et al., 2019]. Considerando esto, las proyecciones sitúan a Chile dentro de los 30 países con mayor riesgo hídrico en el mundo, para el año 2025. [WRI, 2015] Estudios realizados a lo largo del país, muestran que existen altos niveles de Brecha Hídrica en las principales fuentes de agua potable alcanzando, por ejemplo, el 824% en el Río Los Choros, cuenca correspondiente a la Región de Coquimbo, según el estudio realizado por Fundación Chile. [Radiografía del Agua, 2018] La baja disponibilidad de agua en sectores como este no es solo un factor que limite el crecimiento económico, actualmente afecta también el suministro de agua potable para uso residencial y, en consecuencia, la vida de las personas.

Es de esta necesidad, que nace la obligación de buscar otras fuentes de agua potable, como la desalación del agua marina. Se espera que esta alternativa sea la solución futura para el problema hídrico, pero se debe considerar y controlar de manera obligatoria el impacto que generara a futuro en el medio ambiente.

### **Heterogeneidad hídrica presente en Chile**

Debido a su orientación geográfica, Chile presenta variaciones significativas en la disponibilidad de agua conforme se avanza de norte a sur, debido a la cantidad y calidad de

sus cuencas hidrográficas. El rango de oferta hídrica superficial y subterránea [Rivera et al., 2004] varía entre 0.01 metros cúbicos por segundo en algunas cuencas de la Zona Norte y 3.480 metros cúbicos por segundo en cuencas de la Zona Austral. [DGA, 2016].

Por consecuencia, las regiones de la Zona Norte del país se verán más afectadas por la escasez hídrica y es aquí donde, con alta probabilidad, se observará el principal crecimiento de la oferta por agua desalinizada.

### **Brecha hídrica en las cuencas de la región de Coquimbo**

Las principales cuencas de la Región de Coquimbo presentan los índices más bajos de oferta Hídrica: río Los Choros (0.01 m<sup>3</sup>/s), cuencas costeras entre río Choapa y río Quilimarí (0.16 m<sup>3</sup>/s) y río Quilimarí (0.23 m<sup>3</sup>/s). Además, estas cuencas presentan el mayor índice de Brecha Hídrica. El Documento “La radiografía del agua” define La Brecha Hídrica como la potencial falta de agua al evaluar la oferta referencial de agua y la demanda hídrica productiva. Las cuencas antes descritas presentan respectivamente brechas de 824%, 34% y 52%, correspondiente al nivel más alto.

Esto datos nos sugieren que es imperante buscar otras fuentes de agua potable, tanto por el déficit de este recurso, como por el impacto ambiental generado al explotar excesivamente estas cuencas.

### **Panorama actual de desalinización de agua en Chile**

En la actualidad, Chile posee 24 plantas desalinizadoras operando, las cuales generan 5.570 litros por segundo de agua potable. Adicionalmente, existen 22 proyectos en diversas etapas de desarrollo, con los que se alcanzaría una producción de agua potable equivalente a 14.468 litros por segundo. Sin embargo, el 82.4% de la capacidad instalada actual es utilizada para el sector minero e industrial. Se espera que en 2020 entre en operación la primera planta desaladora estatal para consumo humano en el sector costero de Punta Zorro, Caldera, la que abastecería de 1.200 litros por segundo a la Región de Atacama, convirtiéndose en la más grande de Latinoamérica.

Específicamente en la Región de Coquimbo, actualmente existe una planta desaladora para consumo humano en funcionamiento, la cual genera 0.057 litros por segundo y junto a las otras cuatro que están en etapa de proyecto, generarían un total de 0,4 litros por segundo.

Estas cifras indican que aun esta región se encuentra muy lejana a producir la cantidad de agua necesaria para acortar la Brecha hídrica que presentan sus cuencas.

Conociendo las proyecciones actuales sobre el aumento del flujo de agua generado por los proyectos de desalación operando y en desarrollo, y pensando en los proyectos que deberán iniciarse en los próximos años, cabe preguntarse sobre el volumen total de residuos que estos generarán, el impacto ambiental de devolverlos a las costas chilenas, y la normativa ambiental vigente para esta actividad.

### **El problema de la salmuera a nivel global**

Mientras se pronostica que la desalinización del agua de mar será la principal solución al problema de la escasez hídrica para el futuro cercano, por otra parte, se vislumbra la problemática asociada a la cantidad de salmuera generada como residuo en este proceso, cual es el impacto ambiental de su devolución al océano [Dawoud, et al., 2012], los tratamientos para reducir su impacto en el océano y los posibles usos y alternativos de esta [Melián-Martel, et al., 2012]

Globalmente el proceso de desalinización más utilizado es el de Osmosis Inversa, representando un 70% de la producción de agua desalada total.

Algunos años atrás, se aceptaba que la tasa de conversión de agua se encontraba cercana al 50%, es decir, que por cada litro de agua potable producida se generaba un litro de agua hipersalina.

Según un estudio publicado en la revista Science of the Total Environment, [Jones et al., 2019], actualmente se generan 1,5 litros de salmuera por cada litro de agua potable producido, un 50% más de lo esperado.

Extrapolando estas cifras al volumen de producción en Chile, y considerando todos los proyectos operativos y en desarrollo, potencialmente se estaría generando alrededor de 21.702 litros por segundo de salmuera, los que no tendrían otro destino más que su devolución a las costas chilenas.

Por otra parte, la salmuera no representa el único residuo potencialmente dañino para el medio ambiente, y se deben considerar de igual manera el enorme consumo energético, la

emisión de gases GHG y el uso recurrente de químicos que terminan siendo desechados en la salmuera. [Panagopoulos, & Haralambous, 2020.]

### **Sensibilidad del ecosistema marino al aumento de salinidad**

Conocidas las magnitudes volumétricas asociadas a las descargas de salmuera al océano, pertinentes a los procesos de desalación de agua cabe preguntarse por el efecto que estos podrían tener sobre el medio marino. Si bien, no se encuentra en la literatura chilena estudios extensos sobre la sensibilidad del ecosistema marino al aumento de las concentraciones salinas, investigaciones realizadas sobre la supervivencia de especies específicas sometidas a variaciones de sus condiciones de crecimiento [Fernandez & Sánchez, 2003],[ Fernandez,, 2012] revelan una alta sensibilidad a la variación de temperatura, pH y salinidad en la flora marina, afectando entre otras, a la capacidad fotosintética de esta. Como concluyen estos estudios se puede observar reducciones en el crecimiento foliar de ciertas especies y en el crecimiento poblacional de algunas especies de fauna marina, como, por ejemplo, los equinodermos. De este modo, no es posible ignorar el potencial impacto derivado de las descargas de fluidos hiper salinos al océano.

A pesar de esto, estudios de larga duración [Sola, et al. , 2020.], [Pistocchi, et al. ,2020.] revelan que es posible operar plantas desaladoras de manera sostenible en el tiempo, siempre que se planifiquen de manera adecuada ciertos factores como la ubicación de la toma de agua y la descarga de salmuera, entre otros factores. En esta misma dirección, estudios sobre nuevas tecnologías han demostrado que en un futuro será posible instalar plantas de desalación que permitan de forma simultánea la desalación del agua y el tratamiento de sus residuos, generando procesos más eficientes y amigables con el medio ambiente. [Sayed et al., 2020].

### **Estudios de impacto ambiental en Chile**

Con el transcurso de los años, y en vista de la necesidad por aumentar las fuentes de recursos hídricos en diferentes zonas del país, principalmente para usos industriales, se han sometido una serie de proyectos de desalinización de agua marina al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), no debido a la obligación de requerir una Resolución de Calificación Ambiental (RCA), sino por el hecho de ser parte de otros proyectos de mayor envergadura. [Skewes, 2017]

La legislación ambiental vigente en Chile no exige estudios de impacto ambiental para la aprobación de proyectos de desalación, pero en el caso de ser requeridos por otras causales, propone realizar el estudio en diversas categorías como: la alteración de la calidad química del agua, alteración de las especies bentónicas, impacto a las comunidades planctónicas, a la fauna marina, entre otros. [Servicio de evaluación Ambiental, 2019]

Sin embargo, todos los estudios de impacto ambiental generados analizan los residuos producidos por un proyecto en particular, y no consideran el impacto ambiental conjunto de todos los proyectos presentes en una zona determinada, ni el impacto de implementar este tipo de proyectos en zonas previamente degradadas por actividades humanas de otra naturaleza, por lo que podríamos encontrarnos frente a un impacto ambiental potencial mucho mayor al estimado.

### **Mayor riesgo potencial para bahías semicerradas**

Considerando el conocimiento actual del impacto ambiental generado por las descargas de salmuera al mar abierto, cabe preguntarse si el efecto podría amplificarse al verter este residuo en zonas costeras con morfología más cerrada. Estudios realizados en el Mar Rojo [Purnama et al., 2005], el cual es una entrada de mar que podría describirse similar a un canal de gran envergadura señalan que existe un riesgo inminente en la sobreexplotación del agua de mar para su desalación bajo estas condiciones.

Añadido a esto, si consideramos que las descargas de salmuera son un fluido hiperdenso [Loya, 2018], el cual se desplaza rápidamente hacia el fondo del océano, y las altas tasas de dilución que presenta cercanas a la zona de descarga, [Pérez-Díaz, et al., 2017], podemos suponer que existe una alta probabilidad de que las concentraciones salinas se enfrenten a mayores dificultades para dirigirse hacia el mar abierto, afectando en mayor medida el ecosistema marino.

### **Bahía semicerrada Herradura de Guayacán**

La Bahía Herradura de Guayacán se encuentra ubicada a 15 km de la ciudad de La Serena, en la Región de Coquimbo, y presenta una superficie de 3,3 kilómetros cuadrados, y un ancho en su extremo más angosto de 800 metros. No existen caudales significativos de agua dulce que

desemboquen en ella. Su profundidad media es de 19 metros, alcanzado una profundidad de 60 metros en la boca. Se estima que el promedio de salinidad superficial de sus aguas es de 34,85 ppm y 34,52 ppm en el fondo. [Alfsen, 1979].

Finalmente, y habiendo revisado las principales contribuciones que aportan o han aportado a la línea de trabajo de este proyecto, es posible indicar que una oportunidad de desarrollo se encuentra en el hecho que no existe, para el caso de proyectos de desalación de agua de mar que viertan sus residuos en bahías semicerradas, información suficiente o certeza, respecto de la factibilidad ambiental de su implementación. Lo que autoriza la siguiente como contribución para este proyecto de grado.

### **1.3 Contribución del trabajo**

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido que hasta la fecha no se han realizado estudios científicos que estimen el impacto ambiental que podrían generar los proyectos de desalación de agua en bahías semicerradas como la de este caso de estudio. Proponiendo un modelo matemático para estimar el aumento en la salinidad de las costas, desde la perspectiva de la generación de agua potable requerida para satisfacer la demanda de agua futura en la zona. En este sentido contribuye a visualizar la problemática futura, inherente a la potencial producción de salmuera y sus efectos al devolverla al mar, principalmente en topografías de bahía cerrada y entrega datos pertinentes para la planificación y toma de decisiones sobre la contingencia hídrica. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, este trabajo considera los siguientes como objetivo general y objetivos específicos para este trabajo de tesis.

### **1.4 Objetivo general**

Analizar el cambio en la salinidad de las aguas de la bahía Herradura de Guayacán, en base a diversas condiciones simuladas de descarga de salmuera directa en su costa.

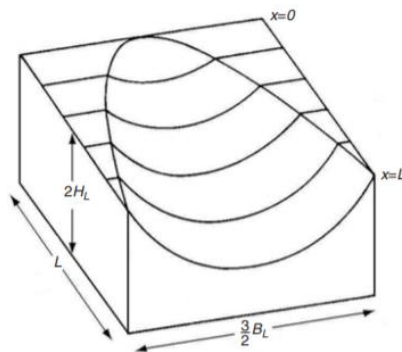
### 1.4.1 Objetivos específicos

- Estudiar las condiciones topográficas e hidrográficas de la bahía Herradura de Guayacán.
- Modelar los flujos de agua y salmuera correspondientes a la instalación de una planta desaladora en la bahía Herradura de Guayacán.
- Analizar el aumento en la salinidad relativa de las costas de esta bahía.

### 1.5 Propuesta metodológica

**Paradigma y diseño:** Se ha optado por emplear una metodología cuantitativa la cual emplea y adapta un modelo matemático, presentado en el artículo “Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas” (Purnama et al.,2005), para simular el impacto de las desaladoras en la salinidad de la costa de la Bahía Herradura de Guayacán, en base a los datos estadísticos y proyecciones hídricas mencionadas con anterioridad. Para la simulación computacional se emplea el software Matlab.

**Modelo matemático:** Para emplear este modelo matemático es necesario trabajar bajo ciertas condiciones simplificadas, dada la escala de variabilidad y desconocimiento de ciertas mediciones. Como se muestra en la figura 1, la Bahía se modelará con una topografía semicerrada y con una morfología de profundidad simple, abriéndose al mar abierto en  $x = L$ , siendo  $x$  la variable que representa la posición en el eje de las abscisas en metros, donde el ancho de la bahía en función de  $x$  se define como:  $B(x) = (3B_L / 2)\sqrt{x/L}$  [metros] y la profundidad de la bahía en función de  $x$  se define como:  $H(x) = (2H_L)x / L$  [metros], siendo  $B_L$  el ancho máximo de la boca de la bahía en metros y  $H_L$  la profundidad máxima de la bahía en metros. El perfil de profundidad de la bahía se especifica como la superficie topográfica  $z/H = -x/L + (y/B_L)^2$ . Como se muestra en la figura es un canal que aumenta su ancho en forma de raíz cuadrada, con sección transversal parabólica, y su valle inferior desciende uniformemente con pendiente  $2H_L / L$ .



*Ilustración 1: Geometría con aumento de ancho en forma de raíz cuadrada, pendiente uniforme y sección transversal parabólica.*

Asumiendo que la transferencia de agua con el mar abierto en  $x = L$ , es la mayor fuente de agua tenemos,  $A_{(x)}U_{(x)} = U_L \int_0^x B_{(z)} dz$ , donde  $A = BH$  es la sección de área transversal,  $U$  es la corriente del oleaje de entrada promedio en metros cúbicos por segundo y  $U_L$  es la corriente del oleaje de entrada en metros cúbicos por segundo para  $x = L$ .

La ecuación de flujo de masa del agua es un balance entre la corriente entrante y el ingreso de agua fresca  $F$  con agotamiento continuo por evaporación a una tasa  $u$  en metros cúbicos por año y extracción de agua por una planta desaladora ubicada en  $x = a$ :  $\frac{d}{dx}(AU - F) = -uB - rQ\delta(x - a)$ (1), donde  $rQ$  es la tasa de producción de agua en metros cúbicos de la planta y  $\delta$  es la función delta de Dirac. La tasa de recuperación de la planta es comúnmente  $r \geq 0.6$ . El agua de mar es removida a una tasa volumétrica  $Q$ , y  $(1 - r)Q$  es la tasa de descarga de salmuera con concentración de sal  $S / (1 - r)$ . La salinidad superficial del agua aumenta alejándose de la boca de la bahía, por lo que se puede utilizar una aproximación unidimensional:

$$\frac{d}{dx}(AUs) - \frac{d}{dx}\left(AD \frac{ds}{dx}\right) = Qs\delta(x - a)$$
(2).

Donde  $D$ , es el coeficiente promedio de la dispersión de corte del oleaje. Integrando y asumiendo salinidad  $s_L$  para  $x = L$ , obtenemos el logaritmo de salinidad relativa:

$$\ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = \int_x^L \frac{dz}{AD} \left( u \int_0^z B(P) dP - F \right) + (1 + r)Q \int_a^L \frac{dz}{AD}, \quad 0 \leq x < a$$

Y

$$\ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = \int_x^L \frac{dz}{AD} \left( u \int_0^z B(P) dP - F + (1 + r)Q \right) + (1 + r)Q \int_a^L \frac{dz}{AD}, \quad a \leq x < L$$

**Plan de análisis de datos:** Se evalúa el modelo matemático descrito, a partir de las condiciones de borde de la zona geografía estudiada, considerando dos escenarios de producción de agua desalada, acordes a la implementación de una planta para el consumo de agua potable urbano y otro escenario para su uso industrial.

**Entorno:** El estudio se realizó en la extensión de la Región de Coquimbo, la IV región de Chile. Esta región posee una población de 757.586 habitantes y una densidad de 46,23 habitantes por kilómetro cuadrado. Cuenta con 3 provincias y 15 comunas, cuya capital regional es la ciudad de La Serena. En cuanto a hidrografía, en esta región existen tres importantes ríos: Elqui, Limarí y Choapa, los que nacen en la cordillera de Los Andes y desembocan en el mar. Estos ríos entregan un flujo medio de 70 metros cúbico por segundo de agua. Además, esta región posee costa en toda su extensión.

**Métodos de verificación y validación del instrumento:** La metodología cuantitativa fue analizada y validada por dos expertos independientes chilenos, quienes sugirieron los ajustes y aproximaciones para que fuese consistente con el diseño de la investigación.

## **1.6 Organización y presentación de este trabajo**

Este trabajo de grado posee cuatro capítulos principales y se organiza como sigue:

Capítulo 1: Presenta el marco conceptual del proyecto, contextualizándolo, proponiendo objetivos y discutiendo desde la literatura la pertinencia del foco de la investigación, su contribución, y presentando a su vez un marco metodológico para su desarrollo e implementación.

Capítulo 2: Asociado a recogida de información, modelos y datos. También explicita resultados.

Capítulo 3: El proyecto de grado, se presenta en formato resumido en un artículo académico que se estructura de la siguiente manera:

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Metodología
5. Resultados
  - a. Discusión de resultados
6. Conclusiones
7. Referencias

Capítulo 4: Finalmente las conclusiones generales derivadas de este trabajo, y una dirección para la investigación futura, la cual considera aquellas preguntas no contestadas durante el desarrollo de este trabajo, se presentan en este capítulo.

Referencias generales

Anexos

## **2 INFORMACIÓN Y RESULTADOS**

Para abordar este trabajo de investigación se ha optado por una aproximación cuantitativa, que permite considerar la siguiente estructura para la presentación de la información y sus análisis:

### **2.1 Procedimiento de recogida y análisis de datos**

Esta investigación se analizó el impacto de las descargas de salmuera en la salinidad relativa de la bahía Herradura de Guayacán. Por tal motivo, en el año 2020 se realizó modelación matemática con la finalidad de generar información para su posterior análisis. En particular se calculó el aumento en la salinidad relativa, como consecuencia de la instalación de una planta desaladora con descarga a 30 metros de la orilla de la bahía.

El método utilizado en este estudio es de carácter teórico, dado que se basa en las leyes físicas que rigen los procesos en la investigación.

#### **Fechas en que se recogieron los datos:**

Entre el 15 de diciembre de 2019 y 5 de marzo de 2020.

#### **Coherencia con lo planificado:**

La recolección de información, que inicialmente se planificó con tomas de muestras de agua y observación en terreno de la zona estudiada, debió ser reemplazada por estudio bibliográfico debido a la imposibilidad de acceder presencialmente a causa de las restricciones de tránsito impuestas como consecuencia a la pandemia Covid-19.

#### **Fortalezas y debilidades del proceso:**

Fortalezas:

- Modelo matemático replicable para otros estudios.
- Permitted dar respuesta a la pregunta de investigación

Las debilidades propias de la investigación de contexto se circunscriben a:

- Incapacidad de recolectar datos de forma presencial.

- Necesidad de comparar resultados obtenidos con información de otras zonas geográficas y proyectos de desalación existentes.
- Carencia de información referente a la biología marina de la zona.

### **Instrumento.**

Para simular las condiciones de borde de la zona estudiada, se utilizó el software Matlab. Este software, mediante la programación, permite la simulación de modelos matemáticos a partir de ecuaciones definidas, junto con la generación de gráficos para visualizar los resultados obtenidos.

## **2.2 Resultados**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo matemático estudiado. Para analizar como la operación de una planta desaladora afectara la salinidad del agua en la bahía Herradura de Guayacán los valores relevantes son el ancho de la boca de la bahía, la profundidad de esta y la distancia desde la costa hasta el punto donde esta se conecta con el mar abierto, respectivamente:  $B_L = 800$  metros,  $H_L = 60$  metros,  $L = 60$  metros, y la tasa de evaporación  $u = 1,5$  metros/año. Otros parámetros relevantes son: la tasa de recuperación de agua potable de la planta  $r = 0,6$ , parámetro típico de una planta por Osmosis Inversa, [Jones et al., 2019], y la tasa de producción anual de agua potable  $rQ = Vm^3 / A\tilde{n}o$ . De este modo, el flujo volumétrico presente se define como  $q = (1 + r)Q / \mu LB_L$ . El parámetro  $\alpha_H U_L$ , correspondiente a la dispersión de la salinidad de acuerdo con las condiciones de oleaje se escaló de tal manera que, si no existen descargas de salmuera en la bahía, concuerda con la salinidad observada en la superficie de esta. Utilizando  $s = 35ppt$  como el valor de salinidad presente en el centro de la bahía [Alfsen, 1979]., el modelo entrega  $uL / \alpha_H U_L H_L = 1807.22$ . Luego, debido a que la bahía no presenta afluentes de agua, se asume  $F = 0$ , y para una planta con  $q = (1 + r)Q / \mu LB_L$  ubicada en  $x = a$ , el logaritmo de salinidad relativa mencionado con anterioridad se resume a  $ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = 0,0369 * \left(\frac{L}{x}\right) + 0,0246 * q \left(\left(\frac{L}{a}\right)^{3/2} - 1\right)$ ,  $0 \leq \frac{x}{L} < \frac{a}{L}$  y  $ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = 0,0369 * \left(\frac{L}{x}\right) + 0,00246 * q \left(\left(\frac{L}{x}\right)^{3/2} - 1\right)$ ,  $\frac{a}{L} \leq \frac{x}{L} < 1$

### **2.2.1 Análisis de datos**

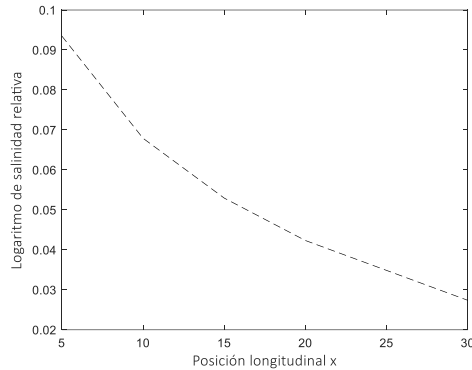
Para evaluar los resultados obtenidos se analizaron dos casos, correspondientes a la instalación de una planta desaladora de envergadura pequeña con un volumen de producción de agua potable diseñado para abastecer la demanda de la población, y una segunda planta de mayor envergadura, destinada a la producción de agua potable para uso industrial. Por último, se comparan los resultados de ambos experimentos.

#### **Caso 1: Planta de pequeña envergadura**

Para estudiar este caso, se evalúa el impacto de una planta desaladora que genera un volumen de agua potable equivalente a 1800 metros cúbicos por año, similar a la planta desaladora

instalada en caleta Chigualoco, Los Vilos, que permite el abastecimiento de agua potable para sus actividades.

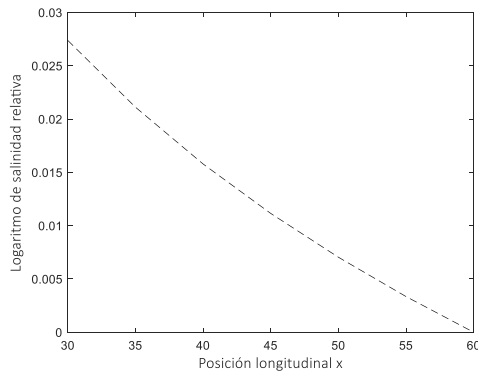
Considerando esto, tenemos  $rQ = 1800m^3, A\tilde{n}o$  y  $q = (1 + r)Q / \mu L B_L = 0.066$ , y si se define la ubicación de la planta a una distancia de 30 metros respecto de la costa tenemos  $x = a = 30$ . Luego, evaluando estos parámetros en el logaritmo de incremento de salinidad relativa se obtuvieron los siguientes resultados:



*Ilustración 2: Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=0.083$  en  $a/L= 0.5$  para  $0 < x < 30$ .*

Como se observa en la figura 2, existe un aumento en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la orilla de 3.43 ppt en  $x=5$  y 0.97 ppt en  $x= 30$ , equivalente a 9.8% y 2.77% respectivamente.

Así mismo, en la figura 3 se observa un aumento considerablemente menor en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la apertura de la bahía hacia al mar abierto, desde 2.13% a 35 metros de la orilla hasta 0.33% a 55 metros de esta. Esto equivale a un aumento de 0.74 ppt y 0.11 ppt respectivamente.



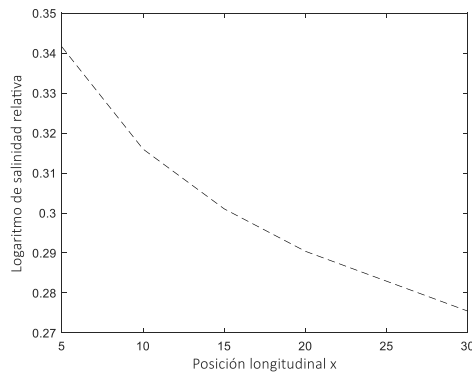
*Ilustración 3: Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=0.083$  en  $a/L= 0.5$  para  $30 < x < 60$ .*

## Caso 2: Planta de mediana envergadura

Para estudiar este caso, se evalúa el impacto de una planta desaladora que genera un volumen de agua potable equivalente a 250.000 metros cúbicos por año, volumen suficiente para abastecer las actividades industrial cercanas a la zona de estudio.

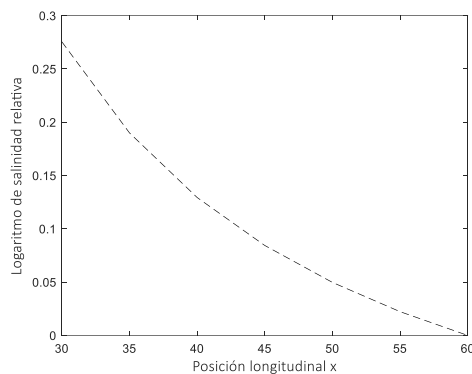
Considerando esto, tenemos  $rQ = 250000m^3/A\bar{n}o$  y  $q = (1 + r)Q/\mu LB_L = 9.26$ , y si se define la ubicación de la planta a una distancia de 30 metros respecto de la costa tenemos  $x = a = 30$ . Luego, evaluando estos parámetros en el logaritmo de incremento de salinidad relativa se obtuvieron los siguientes resultados:

Como se en la figura 4, existe un aumento en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la orilla desde 40.7% a 5 metros de la orilla hasta 31.71% a 30 metros de esta, con una equivalencia respectivamente de 14.25 ppt y 11.10 ppt.



*Ilustración 4: Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=9.26$  en  $a/L= 0.5$  para  $0 < x < 30$ .*

Así mismo, en la figura 5 se observa un aumento considerablemente menor en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la apertura de la bahía hacia al mar abierto, desde 20.9% a 35 metros de la orilla hasta 2.25% a 60 metros de esta. Esto equivale a un aumento de 7.32 ppt y 0.78 ppt respectivamente.



*Ilustración 5: Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=9.26$  en  $a/L= 0.5$  para  $30 < x < 60$ .*

Comparando ambos resultados, si bien la razón de producción de agua de ambas plantas es de 9:1250, su efecto en la salinidad de la bahía tiene una proporción de 98:407, lo que indica que, al aumentar la producción de agua desalada, el efecto en la salinidad del mar es considerablemente menor. Por otra parte, para ambos casos se observa que el aumento de salinidad se produce en mayor magnitud hacia la orilla de la bahía, producido como consecuencia de la dirección del oleaje y la topografía de esta. No obstante, para ambos casos, el nivel de aumento en la salinidad de la bahía es alarmante, y en ningún caso puede ser omitido en la toma de decisiones a la hora de considerar instalar un proyecto en esta zona.

### ***2.2.2 Discusión de resultados***

Respecto de los resultados obtenidos al aplicar el modelo matemático [Purnama et al., 2005], se puede corroborar que el modelo es perfectamente aplicable a menor escala, conociendo las condiciones de borde de la realidad a representar. En efecto, al aplicar el modelo a una escala proporcionalmente mucho menor a la estudiada por los autores de este, se infiere que los resultados reflejan de mejor forma la realidad, ya que los supuestos establecidos son de menor magnitud. Continuando en esta línea, y en concordancia con lo establecido en [Loya, A., 2018 y [Pérez-Díaz, B., et al., 2017], los resultados revelan que al evaluar la descarga de salmuera en un área reducida y de topografía cerrada [Alfsen, 1979] como la bahía Herradura de Guayacán, los efectos de esta en la salinidad relativa son alarmantemente mayores. Por otra parte, cabe destacar que los volúmenes de desalación de agua estudiados en este trabajo están lejos de cubrir la brecha hídrica actual y futura presente en la región descrita en [Radiografía del Agua, 2018], por tanto, la relación impacto-beneficio de instalar una o más plantas desaladoras en esta bahía no sería provechosa ya sea términos ambientales como económico-sociales. Es de suma importancia comprender que si bien el país está pasando por un periodo crítico de mega sequía [Garreaud et al., 2019], y las proyecciones a corto plazo del panorama hídrico no son alentadoras [WRI, 2015], la planificación de los recursos hídricos no puede apuntar en dirección al desmedro de nuestro medio ambiente. Si consideramos los datos del daño producido por el aumento de la salinidad en los ecosistemas marinos descritos en [Fernández, Sánchez, 2003],[Fernández, 2012] que hacen alusión a ecosistemas estudiados en otros países, los resultados indican niveles de salinidad mucho mayores a los tolerados por las diversas especies marinas, es decir, que sería ambientalmente inviable instalar una planta en esta zona ya que podría afectar de manera permanente y sin capacidad de recuperación al ecosistema marino del lugar. Cabe destacar que actualmente no existen estudios específicos para la zona analizada o para la mayoría de las zonas costeras de país. Sumado a esto si consideramos lo establecido en [Jones et al., 2019], los volúmenes de salmuera producido podrían ser incluso mayores a los considerados en este estudio, y a la vez el daño causado al medio ambiente sería mayor. Por otra parte, si consideramos la legislación vigente en cuanto al estudio de impacto ambiental [Servicio de evaluación Ambiental, 2019] para proyectos de esta naturaleza, es necesario estudiar la posibilidad de resguardar legalmente esta zona en particular, y otras bahías con este tipo de topografía, ya que actualmente no están descritos estos riesgos potenciales y por consecuencia, en el futuro podrían vislumbrarse intentos por emplazar proyectos de desalación. Es así, como este trabajo evidencia el riesgo derivado de la implementación de proyectos de desalación de agua en bahías con topografía semicerrada y en particular, el riesgo ambiental inminente de

instalar una planta desaladora en la bahía Herradura de Guayacán. Además, entrega información relevante para la toma de decisiones sobre la planificación hídrica de la Región.

### ***2.2.3 Estrategias de evidencia científica***

Con el fin de proveer rigor científico a este trabajo y poner en evidencia las estrategias adoptadas, durante este proceso se ha empleado:

**Triangulación de informantes:** A través de la participación de distintos grupos de personas, con foco en: su conocimiento, injerencia e involucramiento respecto al tema estudiado.

**Observación prolongada:** El tiempo dedicado a la observación del ecosistema local, así como la relación de sus diferentes actores ha sido prolongada, aproximadamente 1 año, de esta forma es posible corroborar la información recopilada.

**Triangulación de técnicas y fuentes:** Para la recolección de los datos presentados en la investigación se han utilizado diferentes técnicas y fuentes. Entrevistas y artículos de revistas científicas indexadas han sido los principales recursos, sin embargo, también se ha obtenido información de informes de consultoras y seminarios asociados al tema investigado.

**Criterio del valor de verdad:** Para disminuir al máximo el sesgo del experimentador, y así proteger la validez de la investigación, se vela porque los datos levantados reflejen lo más fielmente posible la realidad estudiada.

**Comentario de pares: y comprobaciones con los participantes:** Durante el desarrollo de la investigación los resultados han sido compartidos con actores relevantes, siendo ellos a su vez participantes del mismo, los que han puesto en perspectiva las reflexiones y conclusiones emanadas de los datos recolectados. Por último, es indispensable mencionar que el objetivo de la información presentada no es su generalización sino más bien un primer acercamiento que invite a reflexionar a los involucrados.

### **3 ARTÍCULO**

El presente apartado, recoge la investigación contextualizada motivo de este proyecto de grado, y es presentada en formato de artículo académico. Se trata de un artículo conciso, escrito en el formato típico de revistas especializadas o de conferencias, de acuerdo con reglas específicas definidas por la dirección del programa.

El artículo, ha sido cuidadosamente redactado con el fin de que se haga fácilmente entendible y logre expresar de un modo claro y sintético lo que se pretende comunicar, considerando las citas y referencias respectivas de los estudios que lo fundamentan. El trabajo realizado, se sintetiza entonces como artículo, para facilitar al trabajo de quienes puedan estar interesados en consultar la obra original.

Este trabajo, considera y discute, a través de un proyecto aplicado, desarrollado en un contexto de realidad profesional, la integración de herramientas y conocimientos que se han adquirido en las líneas de desarrollo del programa. Lo que se consolida en una investigación profesional contextualizada a la realidad profesional que se expone, la que se relaciona con líneas y ámbitos específicos abordados en el plan de estudios del programa, permitiendo integrar, de manera adecuada, los conocimientos teóricos y metodológicos desarrollados en él.

# Impacto de la descarga de salmuera en bahías semicerradas: Caso de estudio Bahía Herradura de Guayacán

Vicente Nilo Mann<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Graduado del programa de Magister en Ingeniería Industrial y de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Desarrollo, vnilom@ingenieros.udd.cl*

## Resumen:

Este trabajo presenta las principales problemáticas asociadas desde la perspectiva ambiental, propias de la implementación del proceso de desalinización de agua marina como solución al problema de escasez hídrica. El objetivo de este trabajo es analizar el cambio en la salinidad de las aguas de la bahía Herradura de Guayacán, en base a diversas condiciones simuladas de descarga de salmuera directa en su costa. Para llevarlo a cabo, se emplea una aproximación cuantitativa, que considera las condiciones topográficas y oceanográficas de la bahía Herradura de Guayacán, en conjunto con un modelo matemático para calcular el aumento en la salinidad relativa de sus costas. El estudio muestra que la producción de agua potable por medio de la desalación podría ocasionar un aumento de hasta un 40.7% en la salinidad de las costas en la Bahía de La Herradura ubicada en la Región de Coquimbo al instalar un proyecto de desalación equivalente a 250.000 metros cúbicos por año. Este estudio concluye que, en el corto plazo, el impacto generado por las descargas de salmuera en bahías semicerradas genera un impacto significativamente negativo al medio ambiente, y dado esto, no es recomendable instalar un proyecto de desalación en zonas con esta topografía.

**Palabras clave:** Agua Potable; Escasez Hídrica; Desalación del Agua; Impacto Ambiental; Fluidos Hipersalinos.

## 1. Introducción

El agua es el recurso natural con mayor presencia en nuestro planeta, cubriendo alrededor del 70% de la superficie terrestre. Sin embargo, solo el 2.5% se denomina aguas frescas, las cuales provienen de ríos, lagos y acuíferos, y tan solo el 0.62% es apta para el consumo humano, industrial y agrícola. Sumado a esto, actualmente presenciamos globalmente altos niveles de estrés hídrico a causa de las sequías provenientes del cambio climático, convirtiendo al agua dulce en un bien muy escaso. Las sequías se establecen cuando existe un déficit respecto al registro histórico de precipitación y/o caudal de ríos. En Chile, la sequía que se observa entre la región de Coquimbo y Los Lagos está presente desde el año 2009, siendo la mayor sequía registrada en las últimas décadas, pasando así a denominarse “mega sequía” [Garreaud et al., 2019]. Considerando esto, las proyecciones sitúan a Chile dentro de los 30 países con mayor riesgo hídrico en el mundo, para el año 2025. [WRI, 2015] Estudios realizados a lo largo del país, muestran que existen altos niveles de Brecha Hídrica en las principales fuentes de agua potable alcanzando, por ejemplo, el

824% en el Río Los Choros, cuenca correspondiente a la Región de Coquimbo, según el estudio realizado por Fundación Chile. [Radiografía del Agua, 2018] La baja disponibilidad de agua en sectores como este no es solo un factor que limite el crecimiento económico, actualmente afecta también el suministro de agua potable para uso residencial y, en consecuencia, la vida de las personas.

Es de esta necesidad, que nace la obligación de buscar otras fuentes de agua potable, como la desalación del agua marina. Se espera que esta alternativa sea la solución futura para el problema hídrico, pero se debe considerar y controlar de manera obligatoria el impacto que generara a futuro en el medio ambiente.

### *Heterogeneidad hídrica presente en Chile*

Debido a su orientación geográfica, Chile presenta variaciones significativas en la disponibilidad de agua conforme se avanza de norte a sur, debido a la cantidad y calidad de sus cuencas hidrográficas. El rango de oferta hídrica superficial y subterránea [Rivera et al., 2004] varía entre 0.01 metros cúbicos por segundo en algunas cuencas de la Zona Norte y 3.480 metros

cúbicos por segundo en cuencas de la Zona Austral. [DGA, 2016].

Por consecuencia, las regiones de la Zona Norte del país se verán más afectadas por la escasez hídrica y es aquí donde, con alta probabilidad, se observará el principal crecimiento de la oferta por agua desalinizada.

#### *Brecha hídrica en las cuencas de la región de Coquimbo*

Las principales cuencas de la Región de Coquimbo presentan los índices más bajos de oferta Hídrica: río Los Choros (0.01 m<sup>3</sup>/s), cuencas costeras entre río Choapa y río Quilimarí (0.16 m<sup>3</sup>/s) y río Quilimarí (0.23 m<sup>3</sup>/s). Además, estas cuencas presentan el mayor índice de Brecha Hídrica. El Documento “La radiografía del agua” define La Brecha Hídrica como la potencial falta de agua al evaluar la oferta referencial de agua y la demanda hídrica productiva. Las cuencas antes descritas presentan respectivamente brechas de 824%, 34% y 52%, correspondiente al nivel más alto.

Esto datos nos sugieren que es imperante buscar otras fuentes de agua potable, tanto por el déficit de este recurso, como por el impacto ambiental generado al explotar excesivamente estas cuencas.

#### *Panorama actual de desalinización de agua en Chile*

En la actualidad, Chile posee 24 plantas desalinizadoras operando, las cuales generan 5.570 litros por segundo de agua potable. Adicionalmente, existen 22 proyectos en diversas etapas de desarrollo, con los que se alcanzaría una producción de agua potable equivalente a 14.468 litros por segundo. Sin embargo, el 82.4% de la capacidad instalada actual es utilizada para el sector minero e industrial. Se espera que en 2020 entre en operación la primera planta desaladora estatal para consumo humano en el sector costero de Punta Zorro, Caldera, la que abastecería de 1.200 litros por segundo a la Región de Atacama, convirtiéndose en la más grande de Latinoamérica.

Específicamente en la Región de Coquimbo, actualmente existe una planta desaladora para consumo humano en funcionamiento, la cual genera 0.057 litros por segundo y junto a las otras cuatro que están en etapa de proyecto, generarían un total de 0,4 litros por segundo. Estas cifras indican que aun esta región se encuentra muy lejana a producir la cantidad de agua necesaria para acortar la Brecha hídrica que presentan sus cuencas.

Conociendo las proyecciones actuales sobre el aumento del flujo de agua generado por los proyectos de

desalación operando y en desarrollo, y pensando en los proyectos que deberán iniciarse en los próximos años, cabe preguntarse sobre el volumen total de residuos que estos generarán, el impacto ambiental de devolverlos a las costas chilenas, y la normativa ambiental vigente para esta actividad.

#### *El problema de la salmuera a nivel global*

Mientras se pronostica que la desalinización del agua de mar será la principal solución al problema de la escasez hídrica para el futuro cercano, por otra parte, se vislumbra la problemática asociada a la cantidad de salmuera generada como residuo en este proceso, cual es el impacto ambiental de su devolución al océano [Dawoud, et al., 2012], los tratamientos para reducir su impacto en el océano y los posibles usos y alternativos de esta [Melián-Martel, et al., 2012]

Globalmente el proceso de desalinización más utilizado es el de Osmosis Inversa, representando un 70% de la producción de agua desalada total.

Algunos años atrás, se aceptaba que la tasa de conversión de agua se encontraba cercana al 50%, es decir, que por cada litro de agua potable producida se generaba un litro de agua hipersalina.

Según un estudio publicado en la revista Science of the Total Environment, [Jones et al., 2019], actualmente se generan 1,5 litros de salmuera por cada litro de agua potable producido, un 50% más de lo esperado.

Extrapolando estas cifras al volumen de producción en Chile, y considerando todos los proyectos operativos y en desarrollo, potencialmente se estaría generando alrededor de 21.702 litros por segundo de salmuera, los que no tendrían otro destino más que su devolución a las costas chilenas.

Por otra parte, la salmuera no representa el único residuo potencialmente dañino para el medio ambiente, y se deben considerar de igual manera el enorme consumo energético, la emisión de gases GHG y el uso recurrente de químicos que terminan siendo desechados en la salmuera. [Panagopoulos & Haralambous, 2020.]

Sensibilidad del ecosistema marino al aumento de salinidad

Conocidas las magnitudes volumétricas asociadas a las descargas de salmuera al océano, pertinentes a los procesos de desalación de agua cabe preguntarse por el efecto que estos podrían tener sobre el medio marino. Si bien, no se encuentra en la literatura chilena estudios

extensos sobre la sensibilidad del ecosistema marino al aumento de las concentraciones salinas, investigaciones realizadas sobre la supervivencia de especies específicas sometidas a variaciones de sus condiciones de crecimiento [Fernandez & Sánchez, 2003],[Fernandez, 2012] revelan una alta sensibilidad a la variación de temperatura, pH y salinidad en la flora marina, afectando entre otras, a la capacidad fotosintética de esta. Como concluyen estos estudios se puede observar reducciones en el crecimiento foliar de ciertas especies y en el crecimiento poblacional de algunas especies de fauna marina, como, por ejemplo, los equinodermos. De este modo, no es posible ignorar el potencial impacto derivado de las descargas de fluidos hiper salinos al océano.

A pesar de esto, estudios de larga duración [Sola, et al., 2020.], [Pistocchi, et al. 2020.] revelan que es posible operar plantas desaladoras de manera sostenible en el tiempo, siempre que se planifiquen de manera adecuada ciertos factores como la ubicación de la toma de agua y la descarga de salmuera, entre otros factores. En esta misma dirección, estudios sobre nuevas tecnologías han demostrado que en un futuro será posible instalar plantas de desalación que permitan de forma simultánea la desalación del agua y el tratamiento de sus residuos, generando procesos más eficientes y amigables con el medio ambiente. [Sayed, et al, 2020].

#### *Estudios de impacto ambiental en Chile*

Con el transcurso de los años, y en vista de la necesidad por aumentar las fuentes de recursos hídricos en diferentes zonas del país, principalmente para usos industriales, se han sometido una serie de proyectos de desalinización de agua marina al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), no debido a la obligación de requerir una Resolución de Calificación Ambiental (RCA), sino por el hecho de ser parte de otros proyectos de mayor envergadura. [Skewes, 2017]

La legislación ambiental vigente en Chile no exige estudios de impacto ambiental para la aprobación de proyectos de desalación, pero en el caso de ser requeridos por otras causales, propone realizar el estudio en diversas categorías como: la alteración de la calidad química del agua, alteración de las especies bentónicas, impacto a las comunidades planctónicas, a la fauna marina, entre otros. [Servicio de evaluación Ambiental, 2019]

Sin embargo, todos los estudios de impacto ambiental generados analizan los residuos producidos por un

proyecto en particular, y no consideran el impacto ambiental conjunto de todos los proyectos presentes en una zona determinada, ni el impacto de implementar este tipo de proyectos en zonas previamente degradadas por actividades humanas de otra naturaleza, por lo que podríamos encontrarnos frente a un impacto ambiental potencial mucho mayor al estimado.

#### *Mayor riesgo potencial para bahías semicerradas*

Considerando el conocimiento actual del impacto ambiental generado por las descargas de salmuera al mar abierto, cabe preguntarse si el efecto podría amplificarse al verter este residuo en zonas costeras con morfología más cerrada. Estudios realizados en el Mar Rojo [Purnama et al., 2005], el cual es una entrada de mar que podría describirse similar a un canal de gran envergadura señalan que existe un riesgo inminente en la sobreexplotación del agua de mar para su desalación bajo estas condiciones.

Añadido a esto, si consideramos que las descargas de salmuera son un fluido hiperdenso [Loya, 2018], el cual se desplaza rápidamente hacia el fondo del océano, y las altas tasas de dilución que presenta cercanas a la zona de descarga, [Pérez-Díaz, et al., 2017], podemos suponer que existe una alta probabilidad de que las concentraciones salinas se enfrenten a mayores dificultades para dirigirse hacia el mar abierto, afectando en mayor medida el ecosistema marino.

#### *Bahía semicerrada Herradura de Guayacán*

La Bahía Herradura de Guayacán se encuentra ubicada a 15 km de la ciudad de La Serena, en la Región de Coquimbo, y presenta una superficie de 3,3 kilómetros cuadrados, y un ancho en su extremo más angosto de 800 metros. No existen caudales significativos de agua dulce que desemboquen en ella. Su profundidad media es de 19 metros, alcanzado una profundidad de 60 metros en la boca. Se estima que el promedio de salinidad superficial de sus aguas es de 34,85 ppm y 34,52 ppm en el fondo. [Alfsen, 1979].

Entendida esta realidad, y considerando la revisión bibliográfica presentada, es posible efectuar el siguiente cuestionamiento de contexto: ¿Cuál es el impacto, en términos ambientales, de emplazar una o más plantas desaladoras de agua que viertan sus residuos en la bahía Herradura de Guayacán?

En efecto, la implementación de plantas desaladoras en esta y otras zonas con problemas de escasez hídrica parece una realidad para el futuro próximo, y será

necesario considerar y estudiar en profundidad la implicancia que esto puede traer al ecosistema marino, ya que cualquier solución no debe ir en desmedro de nuestro medio ambiente.

Habiendo recorrido las bases teóricas fundamentales para este estudio, cabe mencionar que la principal motivación para realizarlo ha sido que hasta la fecha no se han realizado estudios científicos que estimen el impacto ambiental que podrían generar los proyectos de desalación de agua en bahías semicerradas como la de este caso de estudio. Proponiendo un modelo matemático para estimar el aumento en la salinidad de las costas, desde la perspectiva de la generación de agua potable requerida para satisfacer la demanda de agua futura en la zona. En este sentido contribuye a visualizar la problemática futura, inherente a la potencial producción de salmuera y sus efectos al devolverla al mar, principalmente en topografías de bahía semicerrada y entrega datos pertinentes para la planificación y toma de decisiones sobre la contingencia hídrica.

Entendido esto, el objetivo de este trabajo es analizar el cambio en la salinidad de las aguas de la bahía Herradura de Guayacán, en base a diversas condiciones simuladas de descarga de salmuera directa en su costa.

## 2. Metodología

**Paradigma y diseño:** Se ha optado por emplear una metodología cuantitativa la cual emplea y adapta un modelo matemático, presentado en el artículo "Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas" (Purnama et al.,2005), para simular el impacto de las desaladoras en la salinidad de la costa de la Bahía Herradura de guayacán, en base a los datos estadísticos y proyecciones hídricas mencionadas con anterioridad. Para la simulación computacional se emplea el software Matlab.

**Modelo matemático:** Para emplear este modelo matemático es necesario trabajar bajo ciertas condiciones simplificadas, dada la escala de variabilidad y desconocimiento de ciertas mediciones. Como se muestra en la figura 1, la Bahía se modelará con una topografía semicerrada y con una morfología de profundidad simple, abriéndose al mar abierto en  $x = L$ , siendo  $x$  la variable que representa la posición en el eje de las abscisas en metros, donde el ancho de la bahía en función de  $x$  se define como:  $B(x) = (3B_L / 2)\sqrt{x/L}$  [metros] y la profundidad de la bahía en función de  $x$  se define como:  $H(x) = (2H_L)x / L$

[metros], siendo  $B_L$  el ancho máximo de la boca de la bahía en metros y  $H_L$  la profundidad máxima de la bahía en metros. El perfil de profundidad de la bahía se especifica como la superficie topográfica  $z/H = -x/L + (y/B_L)^2$ . Como se muestra en la figura 1 es un canal que aumenta su ancho en forma de raíz cuadrada, con sección transversal parabólica, y su valle inferior desciende uniformemente con pendiente  $2H_L / L$ .

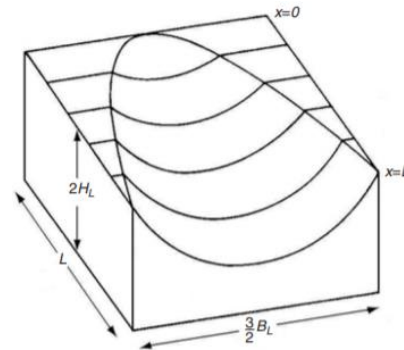


Fig. 1 Geometría con aumento de ancho en forma de raíz cuadrada, pendiente uniforme y sección transversal parabólica.

Asumiendo que la transferencia de agua con el mar abierto en  $x=L$ , es la mayor fuente de agua tenemos,  $A_{(x)}U_{(x)} = U_L \int_0^x B_{(z)} dz$ , donde  $A=BH$  es la sección de área transversal,  $U$  es la corriente de oleaje de entrada promedio en metros cúbicos por segundo y  $U_L$  es la corriente de oleaje de entrada en metros cúbicos por segundo para  $x=L$ .

La ecuación de flujo de masa del agua es un balance entre la corriente entrante y el ingreso de agua fresca  $F$  con agotamiento continuo por evaporación a una tasa  $u$  y extracción de agua por una planta desaladora ubicada en  $\frac{d}{dx}(AU - F) = -uB - rQ\delta(x - a)$ (1), donde  $rQ$  es la tasa de producción de agua de la planta y  $\delta$  es la función delta de Dirac. La tasa de recuperación de la planta es comúnmente  $r \geq 0.6$ . El agua de mar es removida a una tasa volumétrica  $Q$ , y  $(1-r)Q$  es la tasa de descarga de salmuera con concentración de sal  $S(1-r)$ . La salinidad superficial del agua aumenta alejándose de la boca de la bahía, por lo que se puede utilizar una aproximación unidimensional:

$$\frac{d}{dx}(AUs) - \frac{d}{dx}\left(AD \frac{ds}{dx}\right) = Qs\delta(x - a)$$
(2)

Donde D, es el coeficiente promedio de la dispersión de corte del oleaje. Integrando y asumiendo salinidad  $s_L$  para  $x=L$ , obtenemos el logaritmo de salinidad relativa:

$$\ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = \int_x^L \frac{d_z}{AD} \left( u \int_0^z B(P) dP - F \right) + (1+r)Q \int_a^L \frac{d_z}{AD}, \quad 0 \leq x < a$$

Y

$$\ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = \int_x^L \frac{d_z}{AD} \left( u \int_0^z B(P) dP - F + (1+r)Q \right) + (1+r)Q \int_a^L \frac{d_z}{AD}, \quad a \leq x < L$$

*Plan de análisis de datos:* Se evalúa el modelo matemático descrito, a partir de las condiciones de borde de la zona geografía estudiada, considerando dos escenarios de producción de agua desalada, acordes a la implementación de una planta para el consumo de agua potable urbano y otro escenario para su uso industrial.

*Entorno:* El estudio se realizó en la extensión de la Región de Coquimbo, la IV región de Chile. Esta región posee una población de 757.586 habitantes y una densidad de 46,23 habitantes por kilómetro cuadrado. Cuenta con 3 provincias y 15 comunas, cuya capital regional es la ciudad de La Serena. En cuanto a hidrografía, en esta región existen tres importantes ríos: Elqui, Limarí y Choapa, los que nacen en la cordillera de Los Andes y desembocan en el mar. Estos ríos entregan un flujo medio de 70 metros cubico por segundo de agua. Además, esta región posee costa en toda su extensión.

Métodos de verificación y validación del instrumento: la metodología cuantitativa fue analizada y validada por dos expertos independientes chilenos, quienes sugirieron los ajustes y aproximaciones para que fuese consistente con el diseño de la investigación.

### 3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo matemático estudiado. Para analizar como la operación de una planta desaladora afectara la salinidad del agua en la bahía Herradura de Guayacán los valores relevantes son el ancho de la boca

de la bahía, la profundidad de esta y la distancia desde la costa hasta el punto donde esta se conecta con el mar abierto, respectivamente:  $B_L = 800$  metros,  $H_L = 60$  metros,  $L=60$  metros, y la tasa de evaporación  $u=1,5$  metros/año. Otros parámetros relevantes son: la tasa de recuperación de agua potable de la planta  $r=0,6$ , parámetro típico de una planta por Osmosis Inversa, [Jones et al., 2019], y la tasa de producción anual de agua potable  $rQ = Vm^3 / A\tilde{n}o$ . De este modo, el flujo volumétrico presente se define como  $q = (1+r)Q / \mu LB_L$ . El parámetro  $\alpha_H U_L$ , correspondiente a la dispersión de la salinidad de acuerdo con las condiciones de oleaje se escaló de tal manera que, si no existen descargas de salmuera en la bahía, concuerda con la salinidad observada en la superficie de esta. Utilizando  $s=35$ ppt como el valor de salinidad presente en el centro de la bahía [Alfsen, 1979]., el modelo entrega  $uL / \alpha_H U_L H_L = 1807.22$ . Luego, debido a que la bahía no presenta afluentes de agua, se asume  $F=0$ , y para una planta con  $q = (1+r)Q / \mu LB_L$  ubicada en  $x=a$ , el logaritmo de salinidad relativa mencionado con anterioridad se resume a  $\ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = 0,0369 * \left(\frac{L}{x}\right) + 0,0246 * q \left(\left(\frac{L}{a}\right)^{3/2} - 1\right)$ ,  $0 \leq \frac{x}{L} < \frac{a}{L}$ , y  $\ln\left(\frac{s}{s_L}\right) = 0,0369 * \left(\frac{L}{x}\right) + 0,0246 * q \left(\left(\frac{L}{x}\right)^{3/2} - 1\right)$ ,  $\frac{a}{L} \leq \frac{x}{L} < 1$ .

#### 3.1 Análisis de datos

Para evaluar los resultados obtenidos se analizaron dos casos, correspondientes a la instalación de una planta desaladora de envergadura pequeña con un volumen de producción de agua potable diseñado para abastecer la demanda de la población, y una segunda planta de mayor envergadura, destinada a la producción de agua potable para uso industrial. Por último, se comparan los resultados de ambos experimentos.

##### *Caso 1: Planta de pequeña envergadura*

Para estudiar este caso, se evalúa el impacto de una planta desaladora que genera un volumen de agua potable equivalente a 1800 metros cúbicos por año, similar a la planta desaladora instalada en caleta Chigualoco, Los Vilos, que permite el abastecimiento de agua potable para sus actividades.

Considerando esto, tenemos  $rQ = 1800m^3, A\tilde{n}o$  y  $q = (1+r)Q / \mu LB_L = 0.066$ , y si se define la ubicación de la planta a una distancia de 30 metros respecto de la costa tenemos  $x=a=30$ . Luego, evaluando estos

parámetros en el logaritmo de incremento de salinidad relativa se obtuvieron los siguientes resultados:

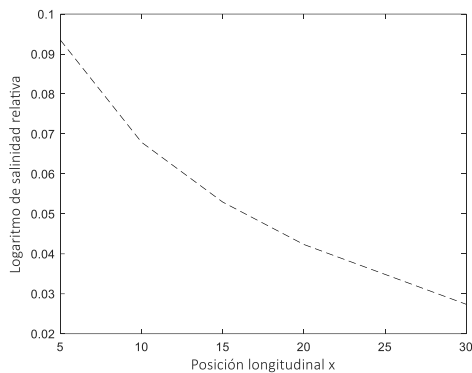


Fig. 2 Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=0.083$  en  $a/L= 0.5$  para  $0 < x < 30$ .

Como se observa en la figura 2, existe un aumento en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la orilla de 3.43 ppt en  $x=5$  y 0.97 ppt en  $x= 30$ , equivalente a 9.8% y 2.77% respectivamente.

Así mismo, en la figura 3 se observa un aumento considerablemente menor en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la apertura de la bahía hacia al mar abierto, desde 2.13% a 35 metros de la orilla hasta 0.33% a 55 metros de esta. Esto equivale a un aumento de 0.74 ppt y 0.11 ppt respectivamente.

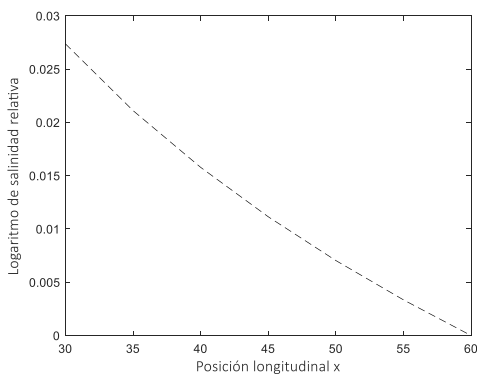


Fig. 3 Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=0.083$  en  $a/L= 0.5$  para  $30 < x < 60$ .

**Caso 2: Planta de mediana envergadura**

Para estudiar este caso, se evalúa el impacto de una planta desaladora que genera un volumen de agua

potable equivalente a 250.000 metros cúbicos por año, volumen suficiente para abastecer las actividades industrial cercanas a la zona de estudio.

Considerando esto, tenemos  $rQ = 250000m^3/Año$  y  $q = (1 + r)Q/\mu LB_L = 9.26$ , y si se define la ubicación de la planta a una distancia de 30 metros respecto de la costa tenemos  $x=a=30$ . Luego, evaluando estos parámetros en el logaritmo de incremento de salinidad relativa se obtuvieron los siguientes resultados:

Como se en la figura 4, existe un aumento en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la orilla desde 40.7% a 5 metros de la orilla hasta 31.71% a 30 metros de esta, con una equivalencia respectivamente de 14.25 ppt y 11.10 ppt.

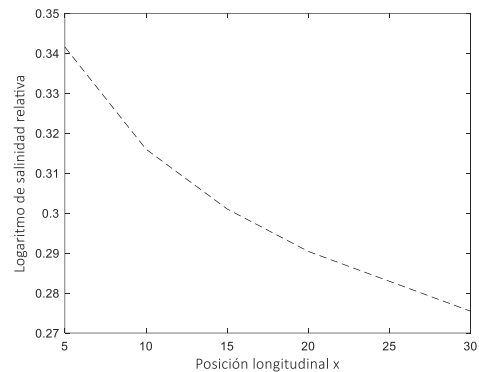


Fig. 4 Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=9.26$  en  $a/L= 0.5$  para  $0 < x < 30$ .

Así mismo, en la figura 5 se observa un aumento considerablemente menor en la salinidad relativa desde la posición de descarga de salmuera hacia la apertura de la bahía hacia al mar abierto, desde 20.9% a 35 metros de la orilla hasta 2.25% a 60 metros de esta. Esto equivale a un aumento de 7.32 ppt y 0.78 ppt respectivamente.

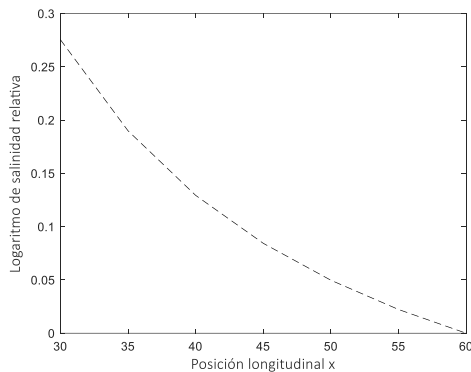


Fig. 5 Logaritmo de salinidad relativa en bahía Herradura de Guayacán debido a una planta desaladora con  $q=9.26$  en  $a/L=0.5$  para  $30 < x < 60$ .

Comparando ambos resultados, si bien la razón de producción de agua de ambas plantas es de 9:1250, su efecto en la salinidad de la bahía tiene una proporción de 98:407, lo que indica que, al aumentar la producción de agua desalada, el efecto en la salinidad del mar es considerablemente menor. Por otra parte, para ambos casos se observa que el aumento de salinidad se produce en mayor magnitud hacia la orilla de la bahía, producido como consecuencia de la dirección del oleaje y la topografía de esta. No obstante, para ambos casos, el nivel de aumento en la salinidad de la bahía es alarmante, y en ningún caso puede ser omitido en la toma de decisiones a la hora de considerar instalar un proyecto en esta zona.

### 3.2 Discusión de resultados

Respecto de los resultados obtenidos al aplicar el modelo matemático [Purnama et al., 2005], se puede corroborar que el modelo es perfectamente aplicable a menor escala, conociendo las condiciones de borde de la realidad a representar. En efecto, al aplicar el modelo a una escala proporcionalmente mucho menor a la estudiada por los autores de este, se infiere que los resultados reflejan de mejor forma la realidad, ya que los supuestos establecidos son de menor magnitud. Continuando en esta línea, y en concordancia con lo establecido en [Loya, 2018 y [Pérez-Díaz, et al., 2017], los resultados revelan que al evaluar la descarga de salmuera en un área reducida y de topografía cerrada [Alfsen, 1979] como la bahía Herradura de Guayacán, los efectos de esta en la salinidad relativa son alarmantemente mayores. Por otra parte, cabe destacar que los volúmenes de desalación de agua estudiados en este trabajo están lejos de cubrir la brecha hídrica actual y futura presente en la región descrita en

[Radiografía del Agua, 2018], por tanto, la relación impacto-beneficio de instalar una o más plantas desaladoras en esta bahía no sería provechosa ya sea términos ambientales como económico-sociales. Es de suma importancia comprender que si bien el país está pasando por un periodo crítico de mega sequía [Garreaud et al., 2019], y las proyecciones a corto plazo del panorama hídrico no son alentadoras [WRI, 2015], la planificación de los recursos hídricos no puede apuntar en dirección al desmedro de nuestro medio ambiente. Si consideramos los datos del daño producido por el aumento de la salinidad en los ecosistemas marinos descritos en [Fernández & Sánchez, 2003],[ Fernández, 2012] que hacen alusión a ecosistemas estudiados en otros países, los resultados indican niveles de salinidad mucho mayores a los tolerados por las diversas especies marinas, es decir, que sería ambientalmente inviable instalar una planta en esta zona ya que podría afectar de manera permanente y sin capacidad de recuperación al ecosistema marino del lugar. Cabe destacar que actualmente no existen estudios específicos para la zona analizada o para la mayoría de las zonas costeras de país. Sumado a esto si consideramos lo establecido en [Jones et al., 2019], los volúmenes de salmuera producido podrían ser incluso mayores a los considerados en este estudio, y a la vez el daño causado al medio ambiente sería mayor. Por otra parte, si consideramos la legislación vigente en cuanto al estudio de impacto ambiental [Servicio de evaluación Ambiental, 2019] para proyectos de esta naturaleza, es necesario estudiar la posibilidad de resguardar legalmente esta zona en particular, y otras bahías con este tipo de topografía, ya que actualmente no están descritos estos riesgos potenciales y por consecuencia, en el futuro podrían vislumbrarse intentos por emplazar proyectos de desalación. Es así, como este trabajo evidencia el riesgo derivado de la implementación de proyectos de desalación de agua en bahías con topografía semicerrada y en particular, el riesgo ambiental inminente de instalar una planta desaladora en la bahía Herradura de Guayacán. Además, entrega información relevante para la toma de decisiones sobre la planificación hídrica de la Región.

### 3.3 Estrategias de evidencia científica

Con el fin de proveer rigor científico a este trabajo y poner en evidencia las estrategias adoptadas, durante este proceso se ha empleado:

Triangulación de informantes: a través de la participación de distintos grupos de personas, con foco

en: su conocimiento, injerencia e involucramiento respecto al tema estudiado.

Observación prolongada: el tiempo dedicado a la observación del ecosistema local, así como la relación de sus diferentes actores ha sido prolongada, aproximadamente 1 año, de esta forma es posible corroborar la información recopilada.

Triangulación de técnicas y fuentes: para la recolección de los datos presentados en la investigación se han utilizado diferentes técnicas y fuentes. Entrevistas y artículos de revistas científicas indexadas han sido los principales recursos, sin embargo, también se ha obtenido información de informes de consultoras y seminarios asociados al tema investigado.

Criterio del valor de verdad: para disminuir al máximo el sesgo del experimentador, y así proteger la validez de la investigación, se vela porque los datos levantados reflejen lo más fielmente posible la realidad estudiada.

Comentario de pares: y comprobaciones con los participantes: durante el desarrollo de la investigación los resultados han sido compartidos con actores relevantes, siendo ellos a su vez participantes del mismo, los que han puesto en perspectiva las reflexiones y conclusiones emanadas de los datos recolectados.

Por último, es indispensable mencionar que el objetivo de la información presentada no es su generalización sino más bien un primer acercamiento que invite a reflexionar a los involucrados.

#### **4. Conclusiones**

Este trabajo establece el impacto al medio ambiente, propio de instalar una planta desaladora en bahías semicerradas. En efecto, los hallazgos muestran en forma general los efectos negativos que tiene por consecuencia el emplazamiento de plantas desaladoras en bahías semicerradas para el medio ambiente y el ecosistema marino. Particularmente este estudio pone en evidencia el potencial aumento de la tasa de salinidad de la bahía Herradura de Guayacán, la incidencia de la envergadura de la planta en este aumento y como la ubicación del punto de descarga de la planta desaladora afectara la dispersión de esta. A la vez, el estudio demuestra la necesidad de procurar el monitoreo constante del ecosistema marino adyacente a la planta para una correcta implementación de un proyecto de desalación. Por último, esta investigación

evidencia que el proceso de acortar la brecha hídrica del país debe ser planificado de forma rigurosa, considerando todos los impactos ambientales que pueden generarse.

En efecto, este trabajo modela la topografía e hidrografía de la bahía Herradura de Guayacán, demostrando las características de bahía semicerrada, y establece que las condiciones de oleaje de la zona dificultan la transferencia de los componentes del agua hacia el mar abierto.

Luego, se modelan los flujos de agua y salmuera correspondientes a la instalación de un proyecto de desalación con descarga directa a la bahía, estableciendo las condiciones de borde pertinentes para el análisis de la transferencia de sal al medio marino.

Por último, analiza los aumentos de la salinidad relativa respectivos a dos casos que difieren en los volúmenes de producción de agua potable, revelando aumentos considerables en los niveles de salinidad del agua, considerando una ubicación de descarga a 30 metros de la orilla de la bahía. Los resultados reflejan un aumento de hasta 40.7% para el caso de una planta de volúmenes de producción industrial. A la vez, se muestra que el aumento de la salinidad relativas se acentúa desde la ubicación de la descarga de salmuera hacia la orilla, y disminuye desde este punto hacia la apertura con el mar abierto. Esto puede implicar deterioro de la flora y fauna marina adyacente a la orilla de la bahía, y en el caso específico de la bahía Herradura de Guayacán, esto puede afectar de forma indirecta la actividad turística de la zona.

En este sentido, la investigación contribuye a visualizar la problemática futura, inherente a la producción de salmuera y sus efectos al devolverla al mar, y entrega datos pertinentes para la planificación y toma de decisiones sobre la contingencia hídrica.

Para abordar las brechas detectadas en este estudio se propone:

- Generar un plan de investigación para estudiar la sensibilidad de los ecosistemas marinos chilenos a la variación de la salinidad, con el fin de evidenciar los potenciales riesgos ambientales derivados de la desalación.
- Estudiar posibles cambios a la legislación vigente, para establecer zonas de protección para bahías semicerradas como la estudiada, y a la vez establecer un protocolo de evaluación

de impacto ambiental riguroso para cualquier proyecto de esta naturaleza.

- Considerar estos estudios para la planificación hídrica, con el fin de lograr cubrir la brecha hídrica del país sin apuntar en desmedro del ecosistema.

## Referencias

- Alfsen, J., Pacheco, A., Berrios, M. (1979). *Publicación ocasional N°1 Serie Oceanografía e Ingeniería. Universidad Del Norte, Coquimbo.*
- Dawoud, M. & Mulla, M.M. (2012). *Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. International Journal of Environment and Sustainability. 1. 22-37. DOI: 10.24102/ijes.v1i3.96.*
- Dirección General de Aguas- DGA. (2016). *Atlas del agua en Chile. Santiago, Chile. Disponible online en: <http://www.dga.cl/atlasdelagua/Paginas/default.aspx>*
- Fernández, Y. & Sánchez, L. (2003). *Efecto de una posible interacción entre el pH y la salinidad sobre el crecimiento de Posidonia oceanica (L) Delile, 1813. INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA, 19 ( 247-252),*
- Fernández, Y. (2012). *Efectos de las variaciones de salinidad sobre angiospermas marinas y su aplicación a los vertidos de plantas desalinizadoras (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, España.*
- Fundación Chile. (2018). *Radiografía del Agua. Disponible online en: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/05/radiografia-del-agua.pdf>*
- Garreaud et al. (2019). *The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. International Journal of Climatology, 40(1), 1-16. DOI: 10.1002/joc.6219*
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). *The state of desalination and brine production: A global outlook. Science of The Total Environment, 657, 1343–1356. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.12.076*
- Loya, A. (2018). *Análisis de la zona de mezcla de vertidos hipersalinos provenientes de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, España.*
- Luo, T., R. Young, P. Reig. 2015. "Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings." *Technical Note. Washington, D.C.: World Resources Institute. Disponible online en: <https://www.wri.org/publication/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings>*
- N. Melián-Martel, J.J. Sadhwani Alonso & S.O. Pérez Báez (2013) *Reuse and management of brine in sustainable SWRO desalination plants, Desalination and Water Treatment, 51:1-3, 560-566, DOI: 10.1080/19443994.2012.713567*
- Panagopoulos, A., & 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-Díaz, B., P. Palomar, S. Castanedo & A. Álvarez (2016) *Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar, Ribagua, 3:2, 66-75, DOI: 10.1016/j.riba.2016.07.003*
- Pistocchi, A., Bleninger, T., Breyer, C., Caldera, U., Dorati, C., Ganora, D., ... Zaragoza, G. (2020). *Can seawater desalination be a win-win fix to our water cycle? Water Research, 115906. doi:10.1016/j.watres.2020.115906*
- Purnama, A., Al-Barwani, H. H., & Smith, R. (2005). *Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas. Desalination, 185(1-3), 79–86. DOI:10.1016/j.desal.2005.03.072*
- Rivera, H., Domínguez, E., Marín, R. y Venegas, R. (2004). *Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Elaborado por IDEAM para el proyecto. Sistema de Información del Medio Ambiente (SIMA), Lima, Perú. Disponible online en: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac/detail.pl?biblionumber=11737>*
- Sayed, E. T., Shehata, N., Abdelkareem, M. A., & Atieh, M. A. (2020). *Recent progress in environmentally friendly bio-electrochemical devices for simultaneous water desalination and wastewater treatment. Science of The Total Environment, 141046. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.1410*
- Servicio de Evaluación Ambiental – SEA. (2019). *Evaluación de Impacto Ambiental, Disponible online en: [https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/revista\\_tecnica.pdf](https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/revista_tecnica.pdf)*
- Skewes Urtubia, F. (2017). *Autorización ambiental para actividades de desalinización de agua de mar. Revista de Derecho Ambiental, (7), pp. 35-59. DOI: 10.5354/07194633.2017.46448*

*Sola, I., Fernández-Torquemada, Y., Forcada, A., Valle, C., del Pilar-Ruso, Y., González-Correa, J. M., & 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*

#### **4 CONCLUSIONES GENERALES**

Este trabajo establece el impacto al medio ambiente, propio de instalar una planta desaladora en bahías semicerradas. En efecto, los hallazgos muestran en forma general los efectos negativos que tiene por consecuencia el emplazamiento de plantas desaladoras en bahías semicerradas para el medio ambiente y el ecosistema marino. Particularmente este estudio pone en evidencia el potencial aumento de la tasa de salinidad de la bahía Herradura de Guayacán, la incidencia de la envergadura de la planta en este aumento y como la ubicación del punto de descarga de la planta desaladora afectara la dispersión de esta. A la vez, el estudio demuestra la necesidad de procurar el monitoreo constante del ecosistema marino adyacente a la planta para una correcta implementación de un proyecto de desalación. Por último, esta investigación evidencia que el proceso de acortar la brecha hídrica del país debe ser planificado de forma rigurosa, considerando todos los impactos ambientales que pueden generarse.

En efecto, este trabajo modela la topografía e hidrografía de la bahía Herradura de Guayacán, demostrando las características de bahía semicerrada, y establece que las condiciones de oleaje de la zona dificultan la transferencia de los componentes del agua hacia el mar abierto.

Luego, se modelan los flujos de agua y salmuera correspondientes a la instalación de un proyecto de desalación con descarga directa a la bahía, estableciendo las condiciones de borde pertinentes para el análisis de la transferencia de sal al medio marino.

Por último, analiza los aumentos de la salinidad relativa respectivos a dos casos que difieren en los volúmenes de producción de agua potable, revelando aumentos considerables en los niveles de salinidad del agua, considerando una ubicación de descarga a 30 metros de la orilla de la bahía. Los resultados reflejan un aumento de hasta 40.7% para el caso de una planta de volúmenes de producción industrial. A la vez, se muestra que el aumento de la salinidad relativas se acentúa desde la ubicación de la descarga de salmuera hacia la orilla, y disminuye desde este punto hacia la apertura con el mar abierto. Esto puede implicar deterioro de la flora y fauna marina adyacente a la

orilla de la bahía, y en el caso específico de la bahía Herradura de Guayacán, esto puede afectar de forma indirecta la actividad turística de la zona.

En este sentido, la investigación contribuye a visualizar la problemática futura, inherente a la producción de salmuera y sus efectos al devolverla al mar, y entrega datos pertinentes para la planificación y toma de decisiones sobre la contingencia hídrica.

Para abordar las brechas detectadas en este estudio se propone:

- Generar un plan de investigación para estudiar la sensibilidad de los ecosistemas marinos chilenos a la variación de la salinidad, con el fin de evidenciar los potenciales riesgos ambientales derivados de la desalación.
- Estudiar posibles cambios a la legislación vigente, para establecer zonas de protección para bahías semicerradas como la estudiada, y a la vez establecer un protocolo de evaluación de impacto ambiental riguroso para cualquier proyecto de esta naturaleza.
- Considerar estos estudios para la planificación hídrica, con el fin de lograr cubrir la brecha hídrica del país sin apuntar en desmedro del ecosistema.

#### **4.1 Propuesta para trabajos futuros**

Como continuación de este trabajo de tesis, hay varias líneas de desarrollo que quedan pendientes, y en las que es posible continuar trabajando; algunas de ellas, están más directamente relacionadas con este trabajo de tesis y son el resultado de preguntas que han ido surgiendo durante el proceso de investigación, como otras que son más tangenciales a la investigación. A continuación, revisaremos trabajos futuros que pueden investigarse como conclusión de esta investigación:

- Realizar una investigación de la tolerancia de la flora y fauna marina de la zona a cambios en la salinidad del agua.
- Una propuesta importante para un trabajo futuro sería poder estudiar la diferencia que existe en el aumento de la salinidad del agua para el caso de un proyecto de desalación existente con descarga de salmuera en una bahía abierta.
- Validar este estudio, con tomas de muestras del agua de la zona estudiada, y observación presencial del comportamiento hidrográfico de esta.

- Avanzar en cualquiera de estos temas, a través de co-guiar una nueva tesis del programa de Magíster en Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Universidad del Desarrollo.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alfsen, J., Pacheco, A., Berrios, M..(1979).Publicación ocasional N°1 Serie Oceanografía e Ingeniería. Universidad Del Norte, Coquimbo.

Dawoud, M. & Mulla, M.M.. (2012). Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. *International Journal of Environment and Sustainability*. 1. 22-37. DOI: 10.24102/ijes.v1i3.96.

Dirección General de Aguas- DGA. (2016). Atlas del agua en Chile. Santiago, Chile. Disponible online en: <http://www.dga.cl/atlasdelagua/Paginas/default.aspx>

Fernández, Y. & Sánchez, L. (2003). Efecto de una posible interacción entre el pH y la salinidad sobre el crecimiento de *Posidonia oceanica* (L) Delile, 1813. *INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA*, 19 ( 247-252),

Fernández, Y..(2012). Efectos de las variaciones de salinidad sobre angiospermas marinas y su aplicación a los vertidos de plantas desalinizadoras (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, España.

Fundación Chile. (2018). Radiografía del Agua. Disponible online en: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/05/radiografia-del-agua.pdf>

Garreaud et al..(2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 1-16. DOI: 10.1002/joc.6219

Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, 1343–1356. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.12.076

Loya, A..(2018). Análisis de la zona de mezcla de vertidos hipersalinos provenientes de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, España.

Luo, T., R. Young, P. Reig. 2015. “Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings.” Technical Note. Washington, D.C.: World Resources Institute. Disponible online en: <https://www.wri.org/publication/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings>

N. Melián-Martel, J.J. Sadhwani Alonso & S.O. Pérez Báez (2013) Reuse and management of brine in sustainable SWRO desalination plants, *Desalination and Water Treatment*, 51:1-3, 560-566, DOI: 10.1080/19443994.2012.713567

Panagopoulos, A., & 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-Díaz, B., P. Palomar, S. Castanedo & A. Álvarez (2016) Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar, *Ribagua*, 3:2, 66-75, DOI: 10.1016/j.riba.2016.07.003

Pistocchi, A., Bleninger, T., Breyer, C., Caldera, U., Dorati, C., Ganora, D., ... Zaragoza, G. (2020). Can seawater desalination be a win-win fix to our water cycle? *Water Research*, 115906. doi:10.1016/j.watres.2020.115906

Purnama, A., Al-Barwani, H. H., & Smith, R. (2005). Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas. *Desalination*, 185(1-3),79–86. DOI:10.1016/j.desal.2005.03.072

Rivera, H., Domínguez, E., Marín, R. y Venegas, R. (2004). Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Elaborado por IDEAM para el proyecto. Sistema de Información del Medio Ambiente (SIMA), Lima, Perú. Disponible online en: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac/detail.pl?biblionumber=11737>

Sayed, E. T., Shehata, N., Abdelkareem, M. A., & Atieh, M. A. (2020). Recent progress in environmentally friendly bio-electrochemical devices for simultaneous water desalination and wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 141046. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.1410


Servicio de Evaluación Ambiental – SEA. (2019). Evaluación de Impacto Ambiental , Disponible online en : [https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/revista\\_tecnica.pdf](https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/revista_tecnica.pdf)

Skewes Urtubia, F. (2017). Autorización ambiental para actividades de desalinización de agua de mar. *Revista de Derecho Ambiental*, (7), pp. 35-59. DOI: 10.5354/07194633.2017.46448

Sola, I., Fernández-Torquemada, Y., Forcada, A., Valle, C., del Pilar-Ruso, Y., González-Correa, J. M., & 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

## 6 ANEXO: REPORTE DE PLAGIO

El reporte de posibilidad de plagio de este trabajo, con otros trabajos publicados entrega un porcentaje de similitud de: 1,2%.



The screenshot displays the UNICHECK plagiarism report interface. At the top, it shows the UNICHECK logo and the title 'artículo plagio'. Below this, it indicates the document was loaded on 11/24/2020 and verified on the same date. A legend identifies the report components: Matches (green), Citas (blue), Referencias (purple), and Puntuación (red). Three circular progress indicators show the following percentages: 1.2% Matches, 2% Citas, and 11% Referencias. A central orange button labeled 'Matches' is visible. Below these indicators, a section titled 'Web fuentes' shows a total of 45 sources. A table lists the top 10 sources with their respective similarity percentages.

Rank	Source	Percentage
1	sobrechileymas.blogspot.com <a href="https://sobrechileymas.blogspot.com/2008/">https://sobrechileymas.blogspot.com/2008/</a>	0.44%
2	www.slideshare.net <a href="https://www.slideshare.net/iverlopezanosbas/afaro-leyton-meza-saenz-atf-fuccion-laboral">https://www.slideshare.net/iverlopezanosbas/afaro-leyton-meza-saenz-atf-fuccion-laboral</a>	0.21%
3	scielo.conicyt.cl <a href="https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=50718-0012201900200151">https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=50718-0012201900200151</a>	0.21%
4	www.scielo.org.co <a href="http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=61657-89612013000100007">http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=61657-89612013000100007</a>	0.21%
5	silo.tips <a href="https://silo.tips/download/estudios-de-administracion-economia-y-turismo">https://silo.tips/download/estudios-de-administracion-economia-y-turismo</a>	0.19%
6	documentop.com <a href="https://documentop.com/united-universidad-de-granada_5a0cd3af1723dd29d29641c.html">https://documentop.com/united-universidad-de-granada_5a0cd3af1723dd29d29641c.html</a>	0.19%
7	dokumen.site <a href="https://dokumen.site/download/turismo-rural-en-mexico-complemento-o-exclusion-en-el-desarrollo-terrestre-rural-juan-jos...">https://dokumen.site/download/turismo-rural-en-mexico-complemento-o-exclusion-en-el-desarrollo-terrestre-rural-juan-jos...</a>	0.16%
8	comunicaciones.poligran.edu.co <a href="https://comunicaciones.poligran.edu.co/web/Experienciasmell.pdf">https://comunicaciones.poligran.edu.co/web/Experienciasmell.pdf</a>	0.16%
9	www.subturismo.gob.cl <a href="http://www.subturismo.gob.cl/wp-content/uploads/2015/06/Manual-de-Ordenanzas-Municipales.pdf">http://www.subturismo.gob.cl/wp-content/uploads/2015/06/Manual-de-Ordenanzas-Municipales.pdf</a>	0.16%
10	oswaldoguaman.weebly.com <a href="https://oswaldoguaman.weebly.com/uploads/5/1/5/5/51804460/ef-completo.pdf">https://oswaldoguaman.weebly.com/uploads/5/1/5/5/51804460/ef-completo.pdf</a>	0.16%

Page 1

## artículo plagio

Cargado: 11/24/2020 | Verificado: 11/24/2020

● Matches ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

11	<b>retos-directivos.eae.es</b> <a href="https://retos-directivos.eae.es/los-bienes-complementarios-y-la-ley-de-la-oferta-y-la-demanda/">https://retos-directivos.eae.es/los-bienes-complementarios-y-la-ley-de-la-oferta-y-la-demanda/</a>	0.16%
12	<b>www.repositorio.usac.edu.gt</b> <a href="http://www.repositorio.usac.edu.gt/2305/1/16_0949.pdf">http://www.repositorio.usac.edu.gt/2305/1/16_0949.pdf</a>	0.16%
13	<b>xdocs.net</b> <a href="https://xdocs.net/documents/m-r-inicio-5cfc136d4c22">https://xdocs.net/documents/m-r-inicio-5cfc136d4c22</a>	0.16%
14	<b>repositorio.undac.edu.pe</b> <a href="http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/728/1/PLAN%20TRIBUTARIO%20TESIS%20ORIGINAL.pdf">http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/728/1/PLAN%20TRIBUTARIO%20TESIS%20ORIGINAL.pdf</a>	0.16%
15	<b>plataforma.responsable.net</b> <a href="http://plataforma.responsable.net/compartir/desarrollo-sostenible-america-latina-caribe-tendencias-avances-desafos-mate...">http://plataforma.responsable.net/compartir/desarrollo-sostenible-america-latina-caribe-tendencias-avances-desafos-mate...</a>	0.16%
16	<b>www.monografias.com</b> <a href="https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/diseño-sistema-gestión-control-almacen/diseño-sistema-gestión-control-almac...">https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/diseño-sistema-gestión-control-almacen/diseño-sistema-gestión-control-almac...</a>	0.16%
17	<b>doczz.es</b> <a href="http://doczz.es/doc/789046/n-%C2%BA-25-2013-cuatrimestre-ii">http://doczz.es/doc/789046/n-%C2%BA-25-2013-cuatrimestre-ii</a>	0.16%
18	<b>www.proyectodescartes.org</b> <a href="https://www.proyectodescartes.org/CarteraLibri/materiales_didacticos/Gobernanza2Ed/index.html">https://www.proyectodescartes.org/CarteraLibri/materiales_didacticos/Gobernanza2Ed/index.html</a>	0.16%
19	<b>docplayer.es</b> <a href="http://docplayer.es/74143408-Actas-aguero-rodriguez-jose-cruz-tomes-berstain-beatriz-rad-de-gestion-regional-del-agua-g...">http://docplayer.es/74143408-Actas-aguero-rodriguez-jose-cruz-tomes-berstain-beatriz-rad-de-gestion-regional-del-agua-g...</a>	0.16%
20	<b>www.sempsp.com</b> <a href="https://www.sempsp.com/es/noticias/ultimas-noticias">https://www.sempsp.com/es/noticias/ultimas-noticias</a>	0.16%
21	<b>documentop.com</b> <a href="https://documentop.com/juritos-nos-levantamos-ministerio-de-educacion_5a0b3a881723d3d5440bbe54d.html">https://documentop.com/juritos-nos-levantamos-ministerio-de-educacion_5a0b3a881723d3d5440bbe54d.html</a>	0.16%
22	<b>documentop.com</b> <a href="https://documentop.com/el-sindrome-de-burnout-en-profesores-universitarios-de-los-sectores_5a0e54e1723dd4ec3f60e2.html">https://documentop.com/el-sindrome-de-burnout-en-profesores-universitarios-de-los-sectores_5a0e54e1723dd4ec3f60e2.html</a>	0.14%
23	<b>hrudnick.sitios.ing.uc.cl</b> <a href="http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno09/modenc/5p1%5d...html">http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno09/modenc/5p1%5d...html</a>	0.14%
24	<b>fcasua.contad.unam.mx</b> <a href="http://fcasua.contad.unam.mx/apuntes/interiores/docs/20172:contaduria/2/apunta/LC_1255_29096_A_Microeconomia.pdf">http://fcasua.contad.unam.mx/apuntes/interiores/docs/20172:contaduria/2/apunta/LC_1255_29096_A_Microeconomia.pdf</a>	0.14%
25	<b>dspace.esPOCH.edu.ec</b> <a href="http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11033/1/52700319.pdf">http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11033/1/52700319.pdf</a>	0.14%
26	<b>www.scielo.org.mx</b> <a href="http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S2007-07052017000200185">http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S2007-07052017000200185</a>	0.14%
27	<b>biesimci.org</b> <a href="https://biesimci.org/fileadmin/2019/documentos/evoa/Informe-guape-2017.pdf">https://biesimci.org/fileadmin/2019/documentos/evoa/Informe-guape-2017.pdf</a>	0.14%
28	<b>documentop.com</b> <a href="https://documentop.com/desarrollo-sostenible-urbanización-y-desigualdad-en-america-latina_5a185a041723d3dc70664c01.html">https://documentop.com/desarrollo-sostenible-urbanización-y-desigualdad-en-america-latina_5a185a041723d3dc70664c01.html</a>	0.14%
29	<b>es.m.wikipedia.org</b> <a href="https://es.m.wikipedia.org/wiki/Proceso_enfermero">https://es.m.wikipedia.org/wiki/Proceso_enfermero</a>	0.14%

## artículo plagio

Cargado: 11/24/2020 | Verificado: 11/24/2020

● Matches ● Cita ● Referencia ● Puntuación

30	<b>documentop.com</b> <a href="https://documentop.com/evaluacion-del-desempeo-con-enfoque-en-las-competencias-laborales_5e1539341723dd5aa88e02...">https://documentop.com/evaluacion-del-desempeo-con-enfoque-en-las-competencias-laborales_5e1539341723dd5aa88e02...</a>	0.14%
31	<b>documentop.com</b> <a href="https://documentop.com/las-posibilidades-de-la-voz-del-alumnado-para-el-cambio-y-la-mejora_5e2549621723dd544b75563...">https://documentop.com/las-posibilidades-de-la-voz-del-alumnado-para-el-cambio-y-la-mejora_5e2549621723dd544b75563...</a>	0.14%
32	<b>eprints.ucm.es</b> <a href="https://eprints.ucm.es/22393/1/T34660.pdf">https://eprints.ucm.es/22393/1/T34660.pdf</a>	0.14%
33	<b>es.wikipedia.org</b> <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_atermoro">https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_atermoro</a>	0.14%
34	<b>informatica.ucm.es</b> <a href="https://informatica.ucm.es/conferencias-de-posgrado/">https://informatica.ucm.es/conferencias-de-posgrado/</a>	0.14%
35	<b>mafiadoc.com</b> <a href="https://mafiadoc.com/capitulo-5-estandares-para-el-mantenimiento-de-hormigueros-y_5085cb88097c474d7d1b4636.html">https://mafiadoc.com/capitulo-5-estandares-para-el-mantenimiento-de-hormigueros-y_5085cb88097c474d7d1b4636.html</a>	0.14%
36	<b>sede.asturias.es</b> <a href="https://sede.asturias.es/portal/site/Asturias/menuitem.1003733838db7342ebc4e19110000077vgnextoid-d7d79d18b61ee...">https://sede.asturias.es/portal/site/Asturias/menuitem.1003733838db7342ebc4e19110000077vgnextoid-d7d79d18b61ee...</a>	0.14%
37	<b>silio.tips</b> <a href="https://silio.tips/download/universidad-de-guayaquil-desarrollo-de-un-help-desk-work-flow-centro-de-servicio">https://silio.tips/download/universidad-de-guayaquil-desarrollo-de-un-help-desk-work-flow-centro-de-servicio</a>	0.14%
38	<b>upcommons.upc.edu</b> <a href="https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79757/MEMORIA_Ester%3CZorzano.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y">https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79757/MEMORIA_Ester%3CZorzano.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y</a>	0.14%
39	<b>www.20minutos.es</b> <a href="https://www.20minutos.es/uploads/files/2020/06/25/programa%20pse.pdf">https://www.20minutos.es/uploads/files/2020/06/25/programa%20pse.pdf</a>	0.14%
40	<b>www.archivomagazine.org</b> <a href="https://www.archivomagazine.org/es/category/entrevistas/">https://www.archivomagazine.org/es/category/entrevistas/</a>	0.14%
41	<b>www.clubensayos.com</b> <a href="https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Explicar-El-Cumplimiento-De-Los-Requisitos-Para-Admitir/696943.html">https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Explicar-El-Cumplimiento-De-Los-Requisitos-Para-Admitir/696943.html</a>	0.14%
42	<b>www.gestipolis.com</b> <a href="https://www.gestipolis.com/modelos-economico-matematicos-la-decision-empresarial/">https://www.gestipolis.com/modelos-economico-matematicos-la-decision-empresarial/</a>	0.14%
43	<b>www.monografias.com</b> <a href="https://www.monografias.com/trabajos16/gestion-almacenes/gestion-almacenes.shtml">https://www.monografias.com/trabajos16/gestion-almacenes/gestion-almacenes.shtml</a>	0.14%
44	<b>www.scielo.br</b> <a href="https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1517-97022017000300879&amp;lng-es&amp;lng-es">https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1517-97022017000300879&amp;lng-es&amp;lng-es</a>	0.14%
45	<b>cyt.rec.uba.ar</b> <a href="https://cyt.rec.uba.ar/pubaco/SiteAssets/Documentos%20de%20Info/Estrategias%20Integradas%20de%20Atencion%20al%20C...">https://cyt.rec.uba.ar/pubaco/SiteAssets/Documentos%20de%20Info/Estrategias%20Integradas%20de%20Atencion%20al%20C...</a>	0.14%

## artículo plagio

Cargado: 11/24/2020 | Verificado: 11/24/2020

● Matchas ● Cita ● Referencia ● Parte sustituida

### Citas

#### Citas incluidas

6

- 1 Efectos de las variaciones de salinidad sobre angiospermas marinas y su aplicación a los vertidos de plantas desalinizadoras (Tesis doctoral).
- 2 Disponible online en: <https://fch.ci/wp-content/uploads/2019/05/radiografi-a-del-agua.pdf> Garreaud et al. (2019).
- 3 Análisis de la zona de mezcla de vertidos hipersalinos provenientes de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa (Tesis doctoral).
- 4 O. Pérez Báez (2013) Reuse and management of brine in sustainable SWRO desalination plants, *Desalination and Water Treatment*, 51:1-3, 560-566, DOI: 10.1080/19443994.2012.713567 Panagopoulos, A.
- 5 Álvarez (2016) Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar, *Ribagua*, 3:2, 66-75, DOI: 10.1016/j.riba.2016.07.003 Pistocchi, A.
- 6 H., & Smith, R. (2005).