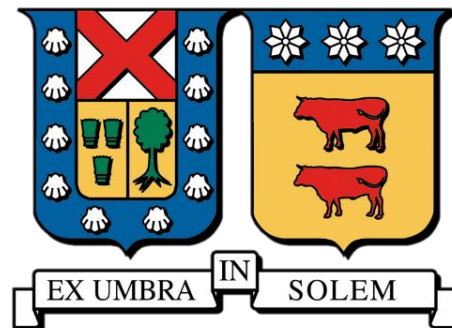


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAISO-CHILE



Desarrollo y prueba experimental de un prototipo de difusor marino para minimizar el impacto de descargas de efluentes

FRANCISCO IGNACIO MONTERO SALFATE
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA:

ADRIÁN ORTIZ

PROFESOR CO-REFERENTE:

PATRICIO WINCKLER

Marzo 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: _DESARROLLO Y PRUEBA EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE DIFUSOR MARINO PARA MINIMIZAR EL IMPACTO DE DESCARGAS DE EFLUENTES_

Nombre del candidato(a): _FRANCISCO IGNACIO MONTERO SALFATE_

Carrera / Grado: _INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA_

Campus: _CASA CENTRAL_ Departamento: _INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL_

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _ADRIÁN ENRIQUE ORTIZ ROJAS_, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _26/03/2026_ Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _26/03/2026_ Firma: 

La grandeza nace de pequeños comienzos.

AGRADECIMIENTOS

En esta página quiero aprovechar de expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que han aportado a mi desarrollo personal y profesional. En primer lugar, agradezco a los profesores Adrián Ortiz y Patricio Winckler por la oportunidad de trabajar en este proyecto y por acompañarme en el desarrollo de esta memoria. También agradezco a Javier Aguirre por su apoyo y la orientación, permitiéndome comprender la fenomenología necesaria para el desarrollo del documento. Mi reconocimiento se extiende al equipo de pañol y apoyo académico, especialmente a Jimmy y Andrés, por su disponibilidad y el apoyo técnico en la fabricación de la instalación experimental, sin la cual no hubiera podido realizar nada.

Agradezco a mis amigos Benjamín y Tomás, que me han acompañado desde nuestra etapa en el colegio y con quienes compartí la etapa universitaria, siendo un apoyo fundamental en mi estadía en Valparaíso. También a todos aquellos amigos que conocí en la universidad, en especial a Carlos, Enzo, Johan, Javier, Nicolás C., Nicolás S., Trinidad, Belén, Josefa, Felipe y Jason, quienes fueron un apoyo fundamental en todas aquellas noches de estudio. Gracias por siempre estar para mí cuando lo necesité, y gracias por hacer que mi experiencia universitaria haya sido la etapa más hermosa que he podido vivir. Recordar también a mis amigos de ambiental, Leonardo, Martín, Victoria, Nicolás, Pablo y Dennis, quienes son personas maravillosas y desearía que todo el mundo pudiera tener amigos como ellos. Agradecer especialmente a Tamara, mi compañera de experiencias y la persona más importante que he conocido, gracias por ser quién eres, por enseñarme a disfrutar las pequeñas cosas de la vida y por tu amor incondicional.

Finalmente, agradezco profundamente a mi familia. A mis padres, Luis y Deysi, quienes me han dado todo y han sido un apoyo constante en este camino, y a mi hermano Luis, por creer siempre en mí; los amo con todo mi corazón. También quiero mencionar con especial cariño a mis abuelos Mario y Gladys, y a mis tíos paternos Mario, Roque y Rodrigo. En particular, agradezco a Francisco y a mi tía Leslie por su ayuda para desarrollar mi práctica, y a mi tía Evelyn, quien ocupa un lugar muy especial en mi corazón. Gracias a todos por su apoyo incondicional y por enseñarme, siempre, a amar y ser una mejor persona.

RESUMEN

La instalación de plantas desalinizadoras, como respuesta a la creciente escasez hídrica del país, plantea importantes desafíos ambientales, especialmente por la descarga de efluentes salinos. En este contexto, la utilización de difusores marinos surge como una solución para mitigar estos impactos. Mediante el presente trabajo de título, se analizaron cuatro diferentes configuraciones de difusores, los cuales fueron evaluados bajo condiciones controladas en laboratorio. Las configuraciones presentaban diferencias en el espaciamiento entre las portas, así como también en el diámetro de cada porta. Esto permitió evaluar la mezcla inicial en diferentes condiciones y cuantificar las descargas efectuadas.

En primer lugar, se desarrolló un diseño de experimentos factorial completo, con el fin de evaluar los efectos de espaciamiento de portas, diámetro y caudal de operación. Gracias a esto, se llevaron a cabo 8 experimentos con su respectivo duplicado, lo que permite disminuir el error experimental de la medición. Los espaciamientos se evaluaron en 2 niveles, siendo de 4 y 8 [cm], al igual que los diámetros de 5 y 8 [mm]. En cuanto al caudal, los niveles utilizados fueron de 3,5 y 4,4 [L/min]. Los experimentos fueron grabados desde una vista superior respecto a los difusores, para analizar ambos chorros de salmuera, al mismo tiempo que se tomaban mediciones de altura de pluma. Una vez llevados a cabo los experimentos, los videos fueron procesados mediante un código en Matlab, donde se analizó el factor de dilución para cada caso y la dilución axial obtenida para cada chorro.

Los perfiles de concentración axial muestran que, a caudales elevados, no se alcanzan valores cercanos a 0 [g/L], principalmente debido a limitaciones de la instalación experimental. En cambio, a caudales bajos se observa una mejor mezcla inicial, con concentraciones cercanas a 0 [g/L]. El análisis matricial de la significancia de los parámetros evidenció que el espaciamiento entre portas, el diámetro y el caudal son variables relevantes, destacando el espaciamiento y el diámetro como los factores de mayor influencia en la mejora de la mezcla, con efectos estimados de 2 y 5,6, respectivamente. Finalmente, no fue posible corroborar la escalabilidad del modelo, ya que el prototipo requeriría un diámetro del orden de 5,7 [m], lo cual resulta operacionalmente inviable en comparación con los aproximadamente 0,4 [m] utilizados en la industria.

Índice General

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	II
CAPÍTULO I.....	1
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo General.....	2
1.2. Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO II.....	3
2. Antecedentes Generales.....	3
2.1. Procesos de Desalinización	3
2.2. Salmuera	4
2.3. Dilución.....	6
2.4. Descarga sobre aguas superficiales	7
2.5. Plumas de Descarga.....	10
2.6. Mecanismos de Mezcla	12
2.7. Comportamiento y Caracterización de la Descarga.....	14
2.8. Impacto Ambiental	19
2.9. Normativa Ambiental	22
CAPITULO III	28
3. Metodología.....	28
3.1. Instalación Experimental	28
3.2. Diseño de Experimentos.....	29
3.3. Diseño del Difusor.....	31
3.4. Descripción del procedimiento experimental	32
	III

3.5. Análisis de Datos	35
CAPÍTULO IV	41
4. Análisis de Resultados	41
4.1. Comportamiento de la Altura de la Pluma.....	41
4.2. Respuesta de la Dilución Axial.....	44
4.3. Respuesta del Modelo Planteado.....	50
4.4. Escalabilidad del Modelo	53
CAPÍTULO V.....	55
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	55
5.1. Conclusiones.....	55
5.2. Recomendaciones	56
REFERENCIAS	57
APÉNDICE	61

Índice de Figuras

Figura 2.1. Representación esquemática de (A) Ósmosis, (B) Equilibrio Osmótico y (C) Ósmosis (Adaptado de Heiranian et al., 2023).....	4
Figura 2.2. Estrategias de descarga para efluentes con flotabilidad negativa. (a) Descarga a la costa mediante canal o vertedero, (b) descarga sumergida mediante tubería y boquilla o difusor (Adaptado de Bleninger & Jirka, 2008).	8
Figura 2.3. (a) Esquema de una pluma térmica estratificada y boyante positiva, sometida a una corriente, (b) esquema de una pluma salina estratificada y boyante negativa, sometida a una corriente (Elaboración propia).	11
Figura 2.4. Esquema de una pluma salina de boyante negativa sometida a una corriente (Roberts et al., 1997).	16
Figura 2.5. Difusor de efluentes densos multipuerto (Adaptado de Abessi & Roberts, 2014).	19
Figura 3.1. Instalación Experimental Descrita (elaboración propia).....	28
Figura 3.2. Difusores diseñados para la prueba experimental. (a) Diseño 1: Espaciamiento de 4 [cm] y diámetro de boquilla de 5 [mm], (b) espaciamiento de 4 [cm] y diámetro de 8 [mm], (c) espaciamiento de 8 [cm] y diámetro de 5 [mm], (d) espaciamiento de 8 [cm] y diámetro de 8 [mm].	32
Figura 3.3. calibración y regresión para determinación de caudal real.	34
Figura 3.4. Calibración espacial para el procesamiento del video.	36
Figura 3.5. Ventanas de análisis sobre las boquillas del difusor.	37
Figura 3.6. Definición de las regiones de interés.	38
Figura 3.7. Evolución temporal de la intensidad.	39
Figura 3.8. Trazado de ejes para determinación de perfiles de concentración.	40
Figura 4.1. Comparación visual de las alturas experimentales obtenidas con respecto a la teórica para el caso de espaciado entre portas de 4 [cm].	41

Figura 4.2. Comparación visual de las alturas experimentales obtenidas con respecto a la teórica para el caso de espaciado entre portas de 8 [cm].	43
Figura 4.3. Pluma en desarrollo presentada en diferentes instantes de tiempo.	45
Figura 4.4. Dilución Axial del Experimento 1.	46
Figura 4.5. Dilución Axial del Experimento 2.	46
Figura 4.6. Dilución Axial del Experimento 3.	47
Figura 4.7. Dilución Axial del Experimento 4.	47
Figura 4.8. Dilución Axial del Experimento 5.	48
Figura 4.9. Dilución Axial del Experimento 6.	48
Figura 4.10. Dilución Axial del Experimento 7.	49
Figura 4.11. Dilución Axial del Experimento 8.	49

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Sensibilidad de los hábitats marinos a las descargas de salmuera.	20
Tabla 2.2. Regulaciones internacionales para la descarga de salmuera (adaptado de Abessi & Roberts, 2018).	22
Tabla 2.3. Límites máximos de Concentración permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales.	26
Tabla 3.1. Factores y niveles del DOE.	29
Tabla 3.2. Diseño Experimental Factorial completo.	30
Tabla 3.3. Diseño de difusores para prueba experimental.	31
Tabla 3.4. Propiedades de las soluciones empleadas.	33
Tabla 4.1. Tabla comparativa de Alturas Experimentales y Teóricas obtenida para el caso de espaciamiento de 4 [cm].	42
Tabla 4.2. Tabla comparativa de Alturas Experimentales y Teóricas obtenida para el caso de espaciamiento de 8 [cm].	43
Tabla 4.3. Valores obtenidos de dilución para cada experimento.	50
Tabla 4.4. Matriz de diseño.	51
Tabla 4.5. Valores de los parámetros e interacciones del modelo.	51
Tabla 4.6. Estimación de la varianza del error puro	52
Tabla 4.7. Significancia de los parámetros e interacciones del modelo.	53
Tabla 4.8. Difusor elegido.	53
Tabla 4.9. Propiedades de descarga reales.	54

1. Introducción

En los últimos años, Chile ha impulsado con fuerza la instalación de plantas desalinizadoras como una estrategia frente a la creciente escasez hídrica. No obstante, este desarrollo conlleva desafíos ambientales importantes, especialmente en lo relativo a la descarga de efluentes salinos, lo que ha motivado la búsqueda de soluciones tecnológicas para mitigar sus efectos. La alternativa más comúnmente empleada ha sido el uso de emisarios submarinos con difusores, los cuales permiten dispersar el efluente a través de múltiples chorros, favoreciendo su dilución en el medio marino.

El diseño de estos difusores requiere una cuidadosa consideración de factores hidrodinámicos y ambientales, a fin de garantizar el cumplimiento de la normativa vigente. Una configuración inadecuada puede resultar en una baja eficiencia de dilución, por lo que es fundamental estudiar la disposición, el ángulo de descarga de las boquillas y el diseño mecánico del sistema.

La descarga de efluentes generados por plantas desalinizadoras y termoeléctricas puede tener efectos significativos sobre los ecosistemas marinos. Para evaluar estos impactos, es necesario analizar el área de influencia, definida como “el lugar geométrico, en planta, donde se exceden los límites máximos de variables como salinidad, temperatura u otras sustancias” (Reglamento del SEIA). Actualmente, estas descargas se realizan en cuerpos de agua como océanos, fiordos y estuarios, bajo la supervisión de la autoridad marítima, y deben ser evaluadas mediante modelaciones específicas de difusores.

La difusión molecular, gobernada por la ley de Fick, describe el movimiento de partículas desde zonas de alta concentración hacia zonas de menor concentración. Sin embargo, en ambientes acuáticos, la difusión turbulenta juega un rol aún más relevante, ya que la mezcla de sustancias se ve intensificada por la presencia de remolinos generados por la dinámica del flujo. Estos remolinos varían en tamaño y comportamiento según la geometría del entorno y las condiciones hidrodinámicas presentes.

En este contexto, la presente memoria propone el desarrollo de un prototipo de difusor marino, cuya evaluación experimental se realizará en colaboración con el Laboratorio de Procesos Costeros de la Universidad de Valparaíso, con el objetivo de optimizar su desempeño y reducir su impacto ambiental.

1.1. Objetivo General

Diseñar, construir y evaluar experimentalmente un modelo de difusor para la descarga de salmuera, optimizando su configuración hidrodinámica con el fin de minimizar el impacto ambiental del efluente.

1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un difusor marino en una instalación experimental que permita su evaluación bajo condiciones controladas.
- Evaluar la eficiencia en la dilución del efluente para diferentes configuraciones del difusor, incluido el sistema de portas.
- Analizar la escalabilidad del diseño, determinando las implicancias de los resultados experimentales en el dimensionamiento de sistemas reales, considerando la eficiencia operacional y aspectos ambientales.

2. Antecedentes Generales

2.1. Procesos de Desalinización

En los últimos años, la desalinización de agua de mar ha sido incorporada y planificada en diversas ciudades costeras alrededor del mundo (p. ej., Singapur, Adelaida, Hong Kong) como un componente clave del suministro de agua para abordar los desafíos de los requerimientos hídricos. Existen diversas tecnologías que permiten eliminar las sales que se encuentran disueltas en el agua de mar. Las primeras plantas desalinizadoras se instalaron a finales de la década de 1950, utilizando tecnologías basadas en energía térmica, favorecidas por el bajo costo de los combustibles fósiles (menos de 3 dólares por barril de petróleo). Sin embargo, ante el aumento progresivo del costo energético, se impulsó la investigación de tecnologías para minimizar el costo total del tratamiento de agua. En ese contexto, las principales tecnologías térmicas empleadas fueron la Destilación Flash Multietapa, en inglés *Multistage Flash Distillation* (MSF), y la Destilación Multiefecto, en inglés *Multi-Effect Distillation* (MED). Ambas se basan en procesos de evaporación y condensación, en los cuales se suministra energía térmica al agua de mar para producir vapor de agua, que posteriormente se condensa para obtener agua dulce (Curto et al., 2021)

Con el paso del tiempo, y en particular a partir de la década de 1960, el proceso de desalinización de agua de mar experimentó una transformación significativa, marcada por la transición desde las tecnologías térmicas hacia el uso de procesos basados en membranas. Como resultado, en las últimas dos décadas la Ósmosis Inversa, en inglés *Reverse Osmosis* (RO), se ha consolidado como la tecnología predominante en la industria de la desalinización a nivel mundial. En 2016 representaba cerca del 65% de la capacidad instalada global, y para 2022 su contribución en el mercado alcanzó aproximadamente el 69% (Orfi et al., 2025).

Dado este rol protagónico, resulta fundamental comprender el principio detrás del funcionamiento de la ósmosis inversa. Este proceso de desalinización se basa en el uso de membranas semipermeables. En la naturaleza, si dos soluciones con diferentes concentraciones de solutos se separan mediante una membrana semipermeable (una capa

selectiva que permite el paso solo a moléculas específicas), el disolvente fluye espontáneamente desde la solución más diluida a la más concentrada para equilibrar el potencial energético de ambas y se detendrá cuando se establezca una presión hidrostática conocida como presión osmótica. Cuando se aplica una presión superior a la osmótica en el lado de alta concentración, el transporte del disolvente se invierte produciéndose la ósmosis inversa (Heiranian et al., 2023). Esto se aprecia de manera gráfica en la Figura 2.1.

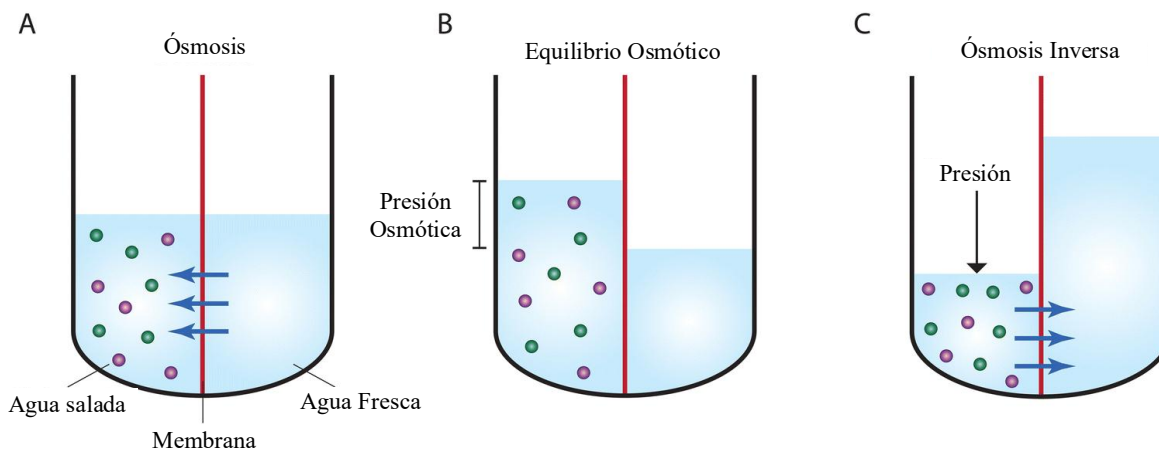


Figura 2.1. Representación esquemática de (A) Ósmosis, (B) Equilibrio Osmótico y (C) Ósmosis (Adaptado de Heiranian et al., 2023).

2.2. Salmuera

En el proceso de ósmosis inversa se generan dos corrientes, el producto principal que corresponde al agua potable, y un subproducto, denominado salmuera, que resulta de la operación de la membrana. Esta última corresponde a agua con una alta concentración de sales disueltas, que contiene la mayoría de los sólidos presentes en el agua de alimentación. Su salinidad suele ser al menos 1,6 veces mayor que la del agua de mar y, además, puede incorporar diversos productos químicos utilizados durante el pretratamiento y la limpieza de membranas y filtros. Entre estos se incluyen antiincrustantes (p. ej., fosfonatos y ácido poliacrílico), agentes desinfectantes (p. ej., hipoclorito de sodio), coagulantes (p. ej., cloruro férrico y sulfato de hierro), biocidas y antiespumantes (Sola et al., 2024). El término “salmuera” es amplio para el subproducto de la desalinización, independiente de su salinidad; sin embargo, este término se utiliza generalmente para corrientes salinas con 55.000 [mg/L] de sólidos disueltos totales (TDS).

Dado este enfoque, las soluciones de salmuera que presenten una concentración de TDS de 55.000 [mg/L] se denominan “salmueras con alto contenido de TDS” (Panagopoulos et al., 2019). Esta alta concentración de sales plantea un desafío para su disposición final. Debido a esto, la industria de la desalinización ha desarrollado distintos enfoques de manejo, entre los que se incluyen la descarga a redes de alcantarillado, la evaporación en estanques, la inyección en pozos profundos y la descarga en aguas superficiales (Chang, 2015).

En la descarga mediante alcantarillado el producto concentrado de salmuera es vertido en el sistema de recolección de aguas residuales más cercano, transportando el efluente a una planta de tratamiento local. Dado que la corriente puede presentar valores altos de salinidad y cantidad de concentrado, la capacidad de tratamiento de estas plantas se ve reducida. Producto de este impacto, la descarga hacia alcantarillado es solo implementada por desalinizadoras de pequeña escala (Panagopoulos et al., 2019).

La evaporación mediante estanques utiliza la energía solar para evaporar el volumen de agua, lo que reduce el concentrado, pero requiere grandes extensiones de tierra y puede provocar la contaminación del suelo y las aguas subterráneas (Chang, 2015). Para la inyección en pozos profundos se busca que la salmuera sea inyectada en formaciones rocosas porosas del subsuelo, siendo su costo asociado de 0.54 a 2.65 USD por metro cúbico de salmuera rechazada. Al igual que en la evaporación mediante estanques, los principales desafíos ambientales asociados a este método son la contaminación de aguas subterráneas y la salinización del suelo (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

Por último, la descarga a aguas superficiales ocurre a través de desagües y emisarios submarinos, con recepción directa en cuerpos de agua abiertos como el océano, ríos y lagos. Este método es la opción más implementada, siendo adoptado por más del 90% de las plantas desalinizadora de agua de mar a nivel mundial, debido a que es la opción menos costosa, pero que a su vez presenta desafíos medioambientales importantes debido a su impacto en el fondo marino (Panagopoulos et al., 2019; Ziolkowska, 2015).

En este contexto y como ya se mencionó anteriormente, la salmuera presenta una variada composición de subproductos tales como aditivos y sustancias químicas, los cuales en general son ignorados en la práctica debido a su uso en poco volumen y frecuencia. Sin embargo, es

necesario complementar y realizar estudios que corroboren que la presencia de dichas sustancias no representa un riesgo medioambiental marino.

Producto de la alta concentración de sales, la descarga de salmuera en el medio marino puede generar un impacto ambiental significativo si no se realizan estudios previos. Actualmente, existen numerosos estudios que determinan los efectos negativos que podrían generar las plantas desalinizadoras sobre el medio acuático. Los efectos más importantes corresponden a Anoxia, que ocurre en los fondos marinos, en donde la salmuera descargada de mayor densidad se hunde y divide la columna de agua en dos capas, por un lado, el agua de mar de menor densidad se ubica sobre la capa de salmuera de mayor densidad. Esta diferencia de densidades genera una pycnoclina que dificulta los procesos de mezcla entre ambos fluidos. Otro efecto importante es la modificación de las condiciones de luz, ya que la presencia de un fluido de mayor densidad en el fondo marino provoca una variación en la cantidad de luz que refleja y absorbe el agua, afectando directamente los procesos de fotosíntesis de las especies vegetales.

2.3. Dilución

La dilución es la mezcla que se produce al entrar en contacto la solución salina descargada y el cuerpo de agua receptor. Este proceso ocurre a medida que el flujo descargado se desplaza e interacciona con el fluido del medio receptor. Al ocurrir esto, se produce un movimiento de materia entre ambos fluidos, hasta que se alcance un determinado punto en donde las concentraciones se igualan.

Es posible expresar la dilución como la relación entre la diferencia de concentración de la pluma descargada y la del fluido del medio receptor. En la Ecuación (2.1) se aprecia dicha relación.

$$S = \frac{C_0 - C_A}{C - C_A} \quad (2.1)$$

Donde C_0 representa la concentración inicial del chorro de descarga, C_A es la concentración del medio marino, C es la concentración salina en un punto determinado. Del mismo modo, si consideramos que la densidad es directamente proporcional a la concentración salina, la

Ecuación (2.1) queda expresada a través de la relación entre la diferencia de densidades de ambos fluidos.

$$S = \frac{\rho_0 - \rho_A}{\rho - \rho_A} \quad (2.2)$$

Donde, similar a la concentración, ρ_0 representa la densidad inicial del chorro de descarga, ρ_A es la densidad del medio marino, ρ es la densidad salina en un punto determinado.

2.4. Descarga sobre aguas superficiales

Como ya se mencionó anteriormente, la descarga en aguas superficiales es uno de los métodos más utilizados por las plantas desalinizadoras para desechar el concentrado de sal. En Estados Unidos, alrededor del 45% de las plantas emplean este método, en el cual la descarga se realiza utilizando un mecanismo distribuido (Chang, 2015). La función esencial de este mecanismo es garantizar una dilución rápida y efectiva del concentrado con el agua circundante. Según diversos autores, se ha sugerido que una dilución de 40 veces el efluente de rechazo es suficiente para proteger al 99% de los organismos marinos (Falkenberg & Styan, 2015; Panagopoulos & Haralambous, 2020). Los mecanismos de distribución que transportan el caudal de salmuera al océano se pueden clasificar en sistemas de descarga superficial (abiertos) y sistemas de descarga submarina (sumergidos).

Los sistemas abiertos utilizan un canal que transporta el concentrado desde la planta hasta la costa, donde es descargado mediante un vertedero. Una descarga superficial directa en la costa genera una mezcla inicial limitada; en consecuencia, el concentrado, al ser más denso que el agua receptora, forma una pluma de alta salinidad que se desplaza a lo largo del fondo marino como una corriente de densidad. Por el contrario, los sistemas sumergidos emplean emisarios submarinos equipados con difusores, los cuales permiten descargar la salmuera en el fondo del mar, alejados de la costa, utilizando mecanismos que promueven una dilución rápida y eficiente. Debido a que el efluente presenta una densidad significativamente mayor que la del agua de mar, la descarga se realiza en forma de chorro con flotabilidad negativa (Bleninger & Jirka, 2008). Estos sistemas se pueden apreciar de mejor forma en la Figura 2.2.

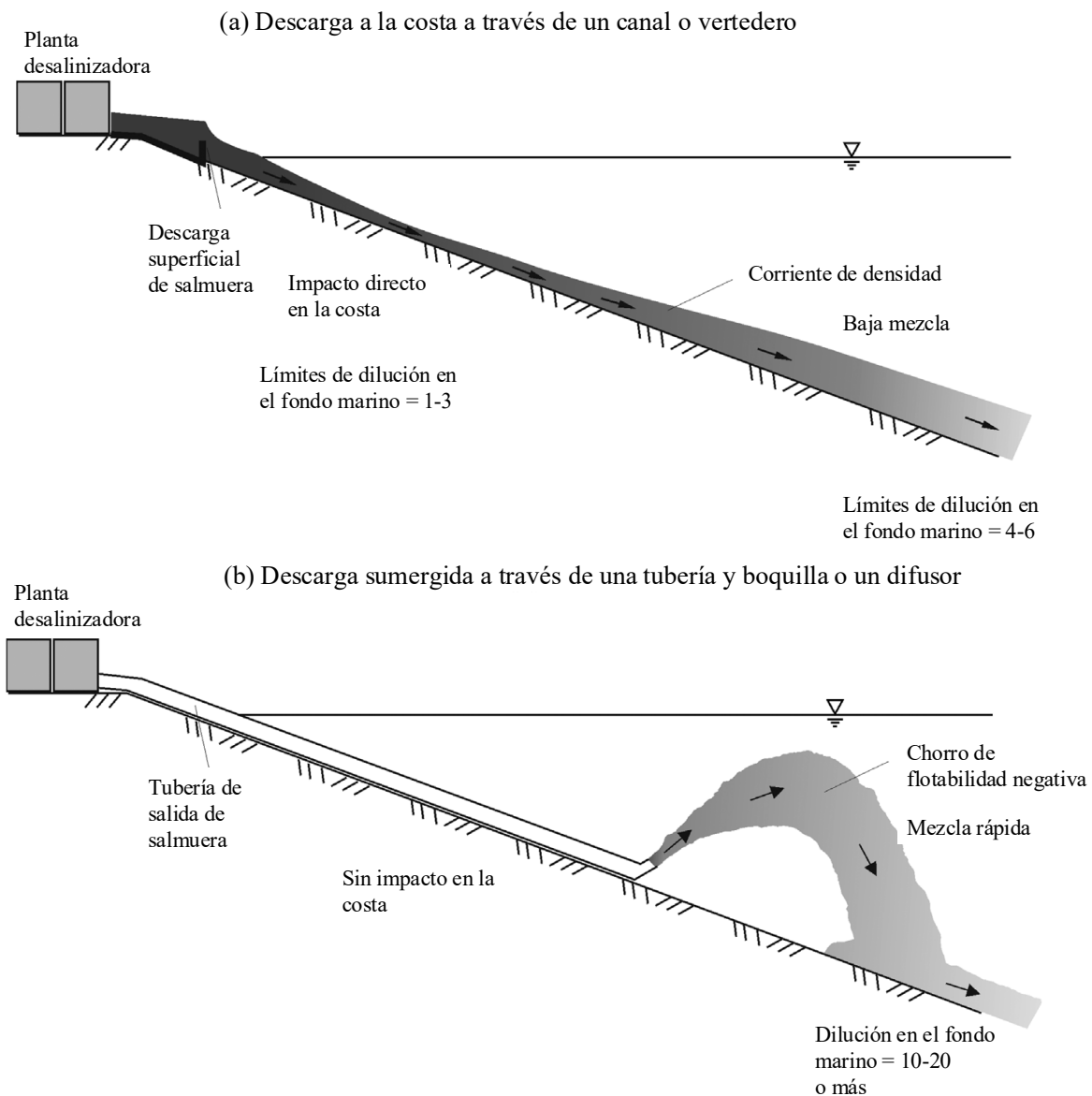


Figura 2.2. Estrategias de descarga para efluentes con flotabilidad negativa. (a) Descarga a la costa mediante canal o vertedero, (b) descarga sumergida mediante tubería y boquilla o difusor (Adaptado de Bleninger & Jirka, 2008).

Los emisarios submarinos se entienden como toda forma de ducto o tubería que está destinada a la descarga, en forma submarina, a cuerpos de aguas costeras hasta las 12 millas náuticas (aproximadamente 22 kilómetros), materias, energía o sustancias en estado líquido, resultantes de un proceso industrial o sanitario. El objetivo principal de estos sistemas es disponer aguas residuales, ya sean contaminantes o no, en zonas donde las condiciones hidrodinámicas favorezcan la mezcla y la dilución del efluente (ARMADA).

Para un diseño adecuado de este tipo de proyectos, se deben tener en cuenta los factores y condiciones bajo los cuales el sistema operará. En general, el diseño de un sistema de descarga requiere la realización de diversos estudios que permitan definir los requisitos mínimos de construcción y operación. Se tienen tres aspectos principales a considerar: Condiciones ambientales, Características de la salmuera descargada y Criterios económicos.

Las condiciones ambientales incluyen la morfología del fondo marino, la batimetría, el oleaje, las corrientes, la temperatura, la densidad del agua y los factores bióticos. Por su parte, las características de la salmuera comprenden el caudal de descarga, el exceso de salinidad y la presencia de compuestos potencialmente contaminantes. Finalmente, los criterios económicos resultan fundamentales y se relacionan con los costos de construcción, instalación y mantenimiento del emisario, asegurando una operación continua y eficiente del sistema.

Un emisario submarino puede dividirse en dos secciones principales. El primer tramo corresponde al ducto de transporte, mientras que el segundo tramo, ubicado en la parte final del emisario, corresponde al difusor, el cual juega un rol importante en el funcionamiento de todo el sistema de descarga. El objetivo de este tramo es introducir el flujo descargado en el medio marino mediante uno o múltiples chorros (Abessi & Roberts, 2014). Para los propósitos de este trabajo, se estudiarán descargas de chorros sumergidos desde el fondo del mar mediante difusores multiporta, debido a sus mejores resultados en términos de mezcla y dilución.

Es fundamental que el diseño del emisario permita establecer un caudal y una velocidad de descarga uniformes, minimizando las pérdidas totales de carga a lo largo del ducto. La pérdida de carga se define como la caída de presión ocasionada por las pérdidas por fricción, las cuales se generan por la interacción del fluido con las paredes del emisario y entre sus propias partículas. Estas pérdidas aumentan significativamente en curvas, estrechamientos, válvulas y en las boquillas de descarga a lo largo del difusor.

El comportamiento del chorro evacuado al mar depende de tres tipos de factores: Parámetros del chorro, Parámetros medioambientales y Factores geométricos. Los parámetros del chorro incluyen la velocidad y niveles de turbulencia iniciales, flujos de masa y momentum, y el flujo asociado al contaminante, que en este caso corresponde al concentrado salino. Los

parámetros medioambientales abarcan niveles de turbulencia naturales, velocidades de corrientes y estratificaciones de densidad. Cuando el chorro alcanza una flotabilidad neutra, sus niveles de salinidad y temperatura pueden diferir al del fluido ambiental, dando lugar a fenómenos de convección de doble difusión, en donde las diferencias de difusividades del calor y salinidad resultan en mezclas verticales mejoradas. Por último, los factores geométricos involucran la forma del chorro, su orientación, su proximidad con otros chorros, interacciones con la superficie libre y el contacto con bordes sólidos, como el fondo marino.

Dado que la dilución del fluido descargado está directamente relacionada con la velocidad de descarga, el objetivo del diseño de un emisario es alcanzar velocidades de salida iguales o lo más cercanas posibles en cada boquilla de descarga, y de esta forma garantizar niveles de dilución consistentes a lo largo del difusor.

De manera complementaria, el efecto del oleaje también influye de forma significativa en el comportamiento del chorro, facilitando su dilución en el ambiente marino. En presencia de oleaje, las escalas de longitud asociadas a la dispersión de la salmuera aumentan considerablemente en comparación con ambientes estancados o de baja energía.

2.5. Plumas de Descarga

En el contexto de estudios oceanográficos e ingeniería ambiental, se denominan plumas a la descarga de efluentes líquidos que son vertidos en un cuerpo de agua receptor. Las plumas se distinguen y clasifican según su densidad en relación con el medio acuático circundante, siendo las dos categorías principales las plumas térmicas y las plumas salinas.

Las plumas térmicas son efluentes que presentan una densidad menor que la del medio circundante (Boyante positiva), ya que se originan típicamente en sistemas de refrigeración de centrales termoeléctricas. En estos sistemas, se utiliza el agua de mar como fluido refrigerante, lo que provoca un aumento de su temperatura. El aumento de temperatura a salinidad constante reduce la densidad del efluente, haciéndolo más ligero que el agua de mar receptora. Como consecuencia, la pluma térmica tiende a ascender desde el punto de descarga. A medida que asciende y se mezcla, su densidad aumenta hasta que se iguale a la densidad del medio. Al llegar a este punto, la pluma se estratifica, formando capas de agua

marina con diferentes densidades y salinidades, las cuales actúan como barreras que limitan la mezcla vertical.

Para efectos de este trabajo, el análisis se centra en las plumas salinas generadas por la descarga de efluentes de salmuera provenientes de plantas desalinizadoras. A diferencia de las plumas térmicas, las plumas salinas presentan una densidad mayor que la del agua de mar circundante, lo que se traduce en una flotabilidad negativa. Como resultado, la salmuera tiende a desplazarse hacia el fondo marino una vez descargada en el medio receptor y en consecuencia se produce la estratificación. Lo mencionado anteriormente, se aprecia de forma cualitativa en la Figura 2.3.

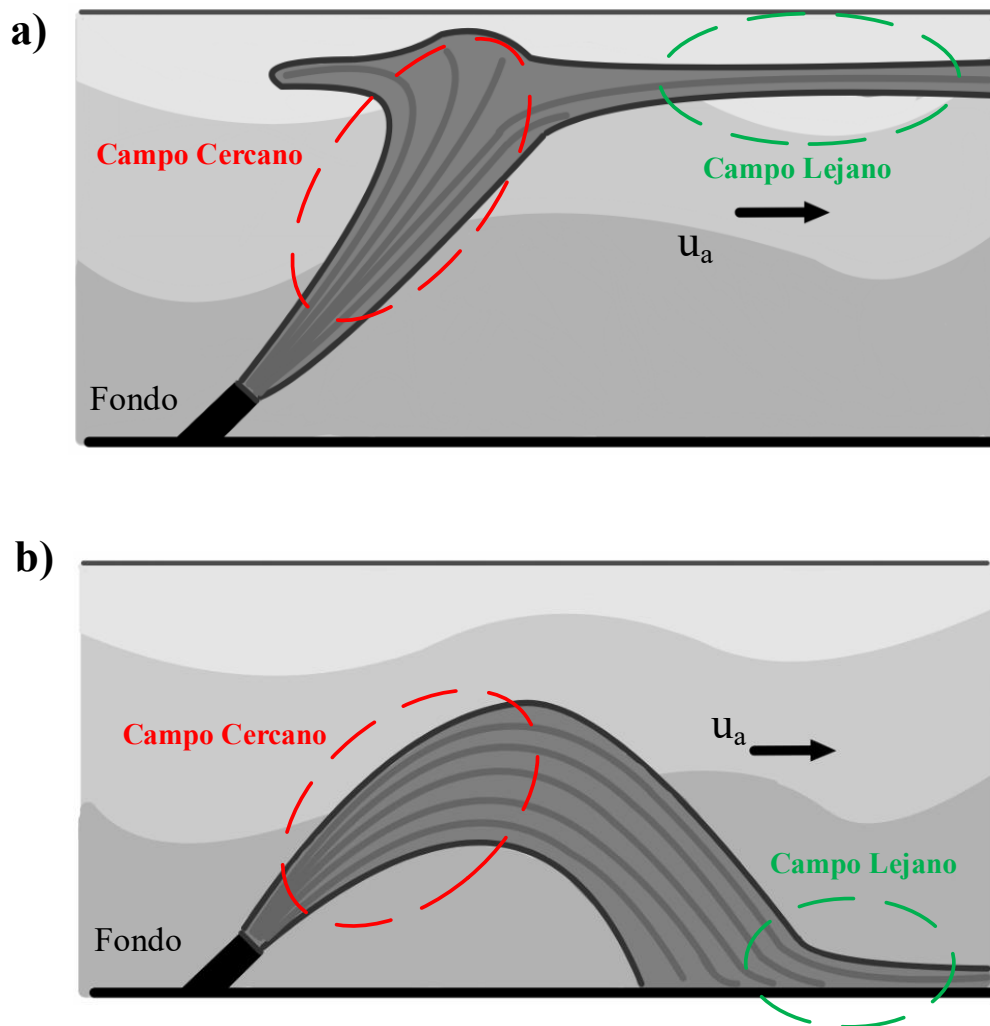


Figura 2.3. (a) Esquema de una pluma térmica estratificada y boyante positiva, sometida a una corriente, (b) esquema de una pluma salina estratificada y boyante negativa, sometida a una corriente (Elaboración propia).

2.6. Mecanismos de Mezcla

Los procesos de mezcla en un sistema, ya sea un fluido gaseoso o líquido, dependen del transporte molecular, el cual se refiere al desplazamiento de propiedades como masa, energía o momentum lineal a través del movimiento de las moléculas. Estas propiedades se transfieren entre regiones del sistema cuando existen gradientes, es decir, diferencias de concentración. En tales casos, se produce un transporte neto desde la zona de mayor concentración hacia la de menor concentración. En fluidos densos, como los líquidos, las moléculas están muy próximas entre sí, lo que hace que el transporte o la difusión ocurra a una velocidad relativamente más lenta en comparación con gases.

Estos procesos de transporte molecular se caracterizan por el mismo tipo general de ecuación de transporte. Para que se lleve a cabo, se necesita de una fuerza impulsora para vencer una resistencia a fin de transportar una propiedad. En la Ecuación (2.3) se aprecia la expresión general de transporte en estado estacionario.

$$\psi_z = -\delta \frac{d\Gamma}{dz} \quad (2.3)$$

Donde ψ_z se define como el flujo de la propiedad, es decir, la cantidad de esta que se transfiere por unidad de tiempo, a través de una sección transversal unitaria perpendicular a la dirección z del flujo. En el caso específico del transporte molecular de masa en un fluido, este flujo se describe mediante la Ley de Fick, la cual es análoga a la expresión general de transporte, pero se aplica particularmente cuando existe un gradiente de concentración, como se aprecia en la Ecuación (2.4).

$$J_{Az} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (2.4)$$

Donde J_{Az} es el flujo de A en $\left[\frac{kg \text{ mol } A}{s \cdot m^2}\right]$, D_{AB} es la difusividad molecular de la molécula A en B, cuyas unidades son $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ y C_A es la concentración de A en $\left[\frac{kg \text{ mol } A}{m^3}\right]$. Dado que los procesos naturales de mezcla son esencialmente tridimensionales y a su vez ocurren en condiciones no estacionarias, es necesario considerar los fenómenos de advección, difusión y reacción

que puedan desarrollarse en el medio, específicamente para las condiciones a las que se encuentran expuestas las plumas salinas.

La advección es un fenómeno físico que se refiere al transporte de una propiedad (como masa, calor o concentración) generado por el movimiento macroscópico del fluido, predominantemente en dirección horizontal. Aunque es conceptualmente similar a la convección, se diferencian en el mecanismo que impulsa el movimiento, donde la convección suele estar asociada a gradientes de temperatura que generan variaciones de densidad y, como consecuencia, un flujo vertical del fluido. La advección se puede expresar de forma matemática mediante la Ecuación (2.5).

$$\textit{Tasa de advección} = \vec{u} \cdot \nabla C_A \quad (2.5)$$

Como ya se mencionó anteriormente, la Ley de Fick permite describir la difusión molecular en sistemas ideales y ocurre a escalas microscópicas. En sistemas como el mar o ríos, donde los flujos son turbulentos, y por ende la mezcla de sustancias se da por la presencia de remolinos que varían en tamaño por las condiciones dinámicas, se debe adaptar la ley de Fick considerando una difusividad turbulenta.

$$J_{Az}^* = -D_t \frac{dC_A}{dz} \quad (2.6)$$

En la Ecuación (2.6) se aprecia la ley de Fick considerando el término de difusividad turbulenta (D_t). Puesto que la ecuación anterior esta expresa el flujo difusivo en una sola dirección se debe considerar el operador nabla para un contexto tridimensional.

$$\vec{J}_{Az}^* = -D_t \nabla C_A \quad (2.7)$$

Luego se debe implementar la divergencia del vector de flujo para aplicar la ley de conservación de la masa.

$$\textit{Divergencia de Flujo} = -\nabla \cdot \vec{J}_{Az}^* \quad (2.8)$$

De las Ecuaciones (2.7) y (2.8) se obtiene la expresión que permite determinar la difusión turbulenta, la cual se aprecia en la Ecuación (2.9).

$$\text{Difusion turbulenta} = D_t \nabla^2 C_A \quad (2.9)$$

Estos términos permiten entender como una sustancia es capaz de moverse, dispersarse y transformarse dentro de un fluido, y se pueden unificar mediante la ecuación de advección-difusión-reacción.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C_A = D_t \nabla^2 C_A + R(C, t, \vec{x}) \quad (2.10)$$

En la Ecuación (2.10) se aprecia la ecuación de advección-difusión-reacción, donde aparece el termino de reacción el cual para el caso particular de la dilución de salmuera en el medio marino puede ser despreciado.

2.7. Comportamiento y Caracterización de la Descarga

La descarga de plumas salinas al medio marino debe realizarse bajo condiciones que permitan maximizar su dilución en el entorno receptor. El comportamiento de la salmuera descargada depende tanto de las características del difusor como de las propiedades del medio receptor en el cual se efectúa la descarga. El presente estudio se centra en el análisis del comportamiento de la salmuera descargada en un medio receptor idealizado. Asimismo, como se mencionó en el apartado 2.5, la salmuera presenta flotabilidad negativa, por lo que tiende a hundirse y desplazarse a lo largo del fondo marino.

Una vez que el chorro sale eyectado de las boquillas de descarga con un cierto ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, el flujo describe un movimiento parabólico, donde el chorro asciende producto del impulso inicial en la descarga y luego desciende hacia el fondo marino debido a la flotabilidad negativa.

El tipo de interacción entre el efluente y el océano permite dividir el dominio horizontal en tres regiones: campo cercano, campo intermedio y campo lejano. El campo cercano corresponde a la zona en la que se desarrolla el chorro de salmuera hasta su colapso; el campo intermedio se extiende desde dicho colapso hasta el inicio de los procesos de mezcla activa; y el campo lejano, donde la dilución del efluente depende principalmente de los mecanismos de difusión y de la turbulencia del ambiente (Baum & Gibbes, 2020).

La región de campo cercano, ubicada en torno al punto de descarga, es aquella en la que el comportamiento de la salmuera depende fundamentalmente de las características del difusor y de la diferencia de densidad entre el efluente y el agua de mar. En esta zona se alcanza la mayor dilución, debido a los intensos procesos de mezcla asociados a las altas velocidades inducidas por el impulso de la descarga, dominados por fenómenos advectivos y turbulentos, actuando en escalas de metros y minutos. Posteriormente, cuando el chorro impacta el fondo marino, se produce el colapso de la turbulencia asociada a la descarga. A partir de este punto, comienza la estratificación del flujo producto de la diferencia de densidades, formándose una corriente hipersalina característica de la región de campo lejano. En esta región, el comportamiento de la salmuera está determinado principalmente por las condiciones del medio ambiente, tales como la rugosidad y pendiente del fondo marino, la velocidad y dirección de las corrientes, así como por las propiedades del flujo, incluyendo su espesor, concentración y momentum (Pérez-Díaz et al., 2016).

La corriente de densidad que se genera tras el impacto del chorro con el fondo marino se expande en función de la dirección de la corriente del medio receptor y de la pendiente del fondo. En aquellos casos en que la dilución alcanzada en el campo cercano resulta insuficiente, esta corriente puede propagarse a grandes distancias, afectando negativamente el fondo del medio receptor. En esta etapa, las variaciones de los parámetros geométricos y de dilución se desarrollan en escalas espaciales del orden de kilómetros y en escalas temporales de horas a días (Pérez-Díaz et al., 2016). Por este motivo, se recomienda que la orientación del difusor sea tal que el chorro descargado tenga una dirección acorde con la corriente predominante del medio receptor y se proyecte hacia zonas de mayor profundidad, con el fin de favorecer los procesos de mezcla y dilución.

El comportamiento y caracterización de la pluma salina se puede apreciar en la Figura 2.4, donde en términos generales, el proceso de dilución puede describirse a partir del campo cercano y campo lejano para el caso de un único chorro de descarga.

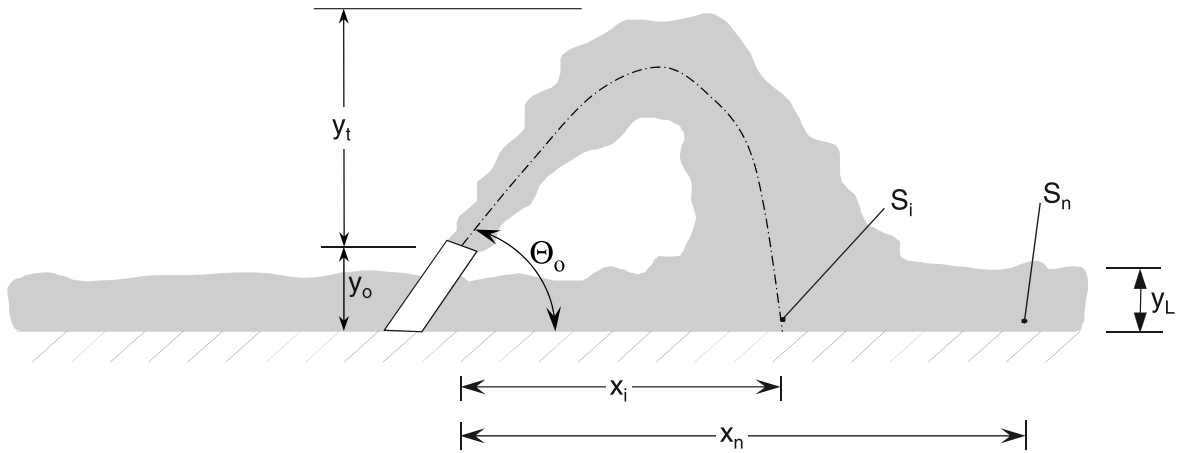


Figura 2.4. Esquema de una pluma salina de boyante negativa sometida a una corriente (Roberts et al., 1997).

La caracterización del fenómeno físico asociado a la descarga de un chorro individual considera que, debido a su flotabilidad negativa, el chorro alcanza una altura máxima de ascenso y posteriormente desciende hasta el fondo, donde se propaga en forma de corriente de densidad. En entornos estacionarios, los chorros descargados verticalmente tienden a retraerse sobre sí mismos, lo que se traduce en menores niveles de dilución. Por esta razón, se emplean con mayor frecuencia chorros inclinados. En la práctica, un ángulo inclinación de boquilla con respecto a la horizontal cercana a 60° se ha adoptado como el estándar en el diseño de difusores.

El chorro se caracteriza principalmente por sus flujos cinemáticos de volumen (Q), momentum (M), y flotabilidad (B), los cuales son expresados mediante las Ecuaciones (2.11), (2.12) y (2.13), respectivamente.

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 u \quad (2.11)$$

$$M = uQ = \frac{\pi}{4} D^2 u^2 \quad (2.12)$$

$$B = g'_0 Q = \frac{\pi}{4} D^2 u g'_0 \quad (2.13)$$

Donde d es el diámetro de la boquilla o porta, u es la velocidad de salida del chorro y g'_0 es la aceleración de gravedad modificada, que se expresa mediante la Ecuación (2.14).

$$g'_0 = \frac{(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} g \quad (2.14)$$

Donde g es la aceleración de gravedad, ρ_a es la densidad del medio y ρ_0 es la densidad del efluente, en donde se cumple que $\rho_0 > \rho_a$. En base a esto, surgen dos grandes escalas de longitud que dominan el fenómeno físico:

$$L_m = \frac{M^{\frac{3}{4}}}{B^{\frac{1}{2}}} \quad (2.15)$$

$$L_Q = \frac{Q}{M^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

Estas escalas ayudan a entender cómo cambia el comportamiento del chorro a medida que se aleja de la boquilla, en donde L_Q es una medida de la distancia a lo largo de la cual el flujo volumétrico del fluido ambiental es arrastrado y se vuelve aproximadamente igual al flujo volumétrico inicial Q . Para distancias desde la boquilla mucho mayores que L_Q , el flujo volumétrico inicial pierde importancia dinámica. Para un chorro con flotabilidad positiva, L_m es una medida de la distancia a lo largo de la cual la flotabilidad genera un momentum aproximadamente igual al flujo de momentum inicial M . Para distancias desde la boquilla mucho mayores que L_m , el efecto del momentum inicial se vuelve insignificante. Sin embargo, para el caso actual de un chorro con flotabilidad negativa, el flujo volumétrico siempre será un parámetro importante, ya que la componente vertical del momentum y la flotabilidad no tienen la misma dirección.

Para comprender el proceso se debe asumir un flujo completamente turbulento, es decir, con un número de Reynolds mayor a 2.000 ($Re = \rho u d / \mu$), y se deben emplear las aproximaciones de Boussinesq, las cuales establecen que las variaciones de densidad del chorro de salmuera son despreciables, excepto en los términos donde interviene la flotabilidad. Bajo estas consideraciones, y para un vertido de salmuera con un ángulo de inclinación fijo θ_0 , es posible determinar la siguiente relación:

$$\frac{y_t}{DF_d}, \frac{x_i}{DF_d}, \frac{S_i}{DF_d}, \frac{x_n}{DF_d}, \frac{S_n}{DF_d} = f(u_r F_d) \quad (2.17)$$

Donde $u_r = u_a/u$, es la razón entre la velocidad ambiental y la velocidad de descarga de salmuera, y F_d corresponde al Froude densimétrico del efluente. El Froude densimétrico corresponde a un número adimensional que compara el momentum de un fluido que se descarga como un chorro, con las fuerzas de flotabilidad, indicando si el chorro se sumergirá o se mezclará rápidamente con el medio circundante. Este número se expresa mediante la Ecuación (2.18).

$$F_d = \frac{u}{\sqrt{g'_0 D}} \quad (2.18)$$

Si el número de Froude densimétrico es mayor que aproximadamente 20, el flujo volumétrico Q no es dinámicamente significativo, es decir, el diámetro de la boquilla no es una escala de longitud importante del flujo. En este escenario, y considerando además que la descarga se realiza en un medio receptor estacionario, la velocidad ambiental puede asumirse igual a cero. Bajo estas condiciones, los parámetros geométricos y de dilución de la Ecuación (2.17) dependerán únicamente de una constante, tal como se aprecia en la Ecuación (2.19).

$$\frac{y_t}{DF_d} = 2.2; \frac{x_i}{DF_d} = 2.4; \frac{S_i}{F_d} = 1.6; \frac{x_n}{DF_d} = 9.0; \frac{S_n}{F_d} = 2.6 \quad (2.19)$$

En descargas donde el difusor está integrado por múltiples portas, la variable que indica la distancia L_p entre las portas debe ser considerada en la Ecuación (2.17). No obstante, al considerar la velocidad ambiental igual a cero, es posible definir una nueva expresión, la cual se presenta en la Ecuación (2.20).

$$\frac{y_t}{DF_d}, \frac{x_i}{DF_d}, \frac{S_i}{F_d}, \frac{x_n}{DF_d}, \frac{S_n}{F_d} = f\left(\frac{L_p}{DF_d}\right) \quad (2.20)$$

De esta forma, los parámetros geométricos y de dilución quedan únicamente en función de L_p/DF_d , donde L_p se aprecia de manera gráfica en la Figura 2.5.

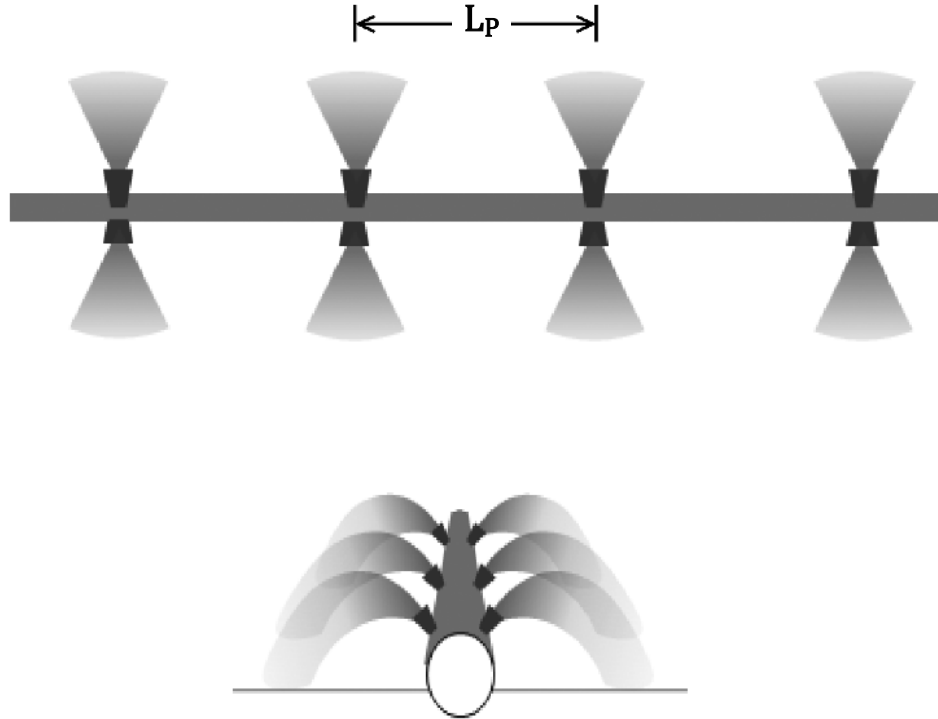


Figura 2.5. Difusor de efluentes densos multipuerto (Adaptado de Abessi & Roberts, 2014).

Para este caso, Abessi y Roberts (2014) proponen las siguientes ecuaciones asintóticas para descargas bilaterales, diferenciando entre espaciamientos de puertos estrechos, cuando $L_p/DF_d < \sim 2$, y espaciamientos amplios, cuando $L_p/DF_d > \sim 2$. Las expresiones correspondientes a los parámetros geométricos y de dilución se presentan en las Ecuaciones (2.21) y (2.22), respectivamente.

$$\frac{y_t}{DF_d} = 1.9 \left(\frac{L_p}{DF_d} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \frac{x_i}{DF_d} = 2.0 \left(\frac{L_p}{DF_d} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \frac{x_n}{DF_d} = 6.0 \left(\frac{L_p}{DF_d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

$$\frac{S_i}{F_d} = 0.9 \left(\frac{L_p}{DF_d} \right); \quad \frac{S_n}{F_d} = 1.1 \left(\frac{L_p}{DF_d} \right) \quad (2.22)$$

2.8. Impacto Ambiental

El impacto ambiental que este tipo de proyectos genera en el medio marino ha sido ampliamente estudiado, identificándose diversos aspectos que deben ser considerados en su evaluación. Entre las principales consideraciones asociadas a los potenciales impactos ambientales se incluyen (Voutchkov, 2013):

- Evaluación de la dispersión de la descarga.
- Evaluación de la toxicidad del efluente,
- Evaluación del cumplimiento de la normativa de la calidad del agua del efluente,
- Determinación del umbral de tolerancia de organismos marinos respecto a la salinidad.

Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a salinidades superiores a los niveles naturales puede afectar negativamente la integridad de organismos marinos, incluyendo vertebrados, invertebrados, pastos marinos y poliquetos, siendo estos últimos gusanos marinos, especialmente cuando el efluente es descargado en cuerpos receptores ambientalmente sensibles (Kress et al., 2020; Lattemann & Höpner, 2008)

Para identificar la vulnerabilidad de un medio marino, se han dividido los hábitats del mundo en 15 categorías, jerarquizándolos según su sensibilidad al concentrado de salmuera (Höpner & Windelberg, 1997). Esta clasificación se presenta en la Tabla 1, donde una sensibilidad de 1 corresponde a ambientes de baja sensibilidad, mientras que una sensibilidad de 15 representa hábitats altamente sensibles a una amplia variedad de impactos ambientales.

Tabla 2.1. Sensibilidad de los hábitats marinos a las descargas de salmuera.

Sensibilidad	Hábitat marino
1	Costas oceánicas de alta energía, rocosas o arenosas, con corrientes paralelas a la costa.
2	Costa rocosa expuesta
3	Costa madura (movilidad de sedimentos)
4	Surgencia costera
5	Costa de mareas suaves de alta energía
6	Estuarios
7	Llanuras rocosas de arena, lodo, playa de baja energía
8	Sabkhas costeras
9	Fiordos
10	Bahía poco profunda de baja energía y laguna semicerrada
11	Esteras de algas (cianobacterias)

Sensibilidad	Hábitat marino
12	Bahía de algas y bajíos
13	Arrecifes de coral
14	Marisma salina
15	Manglar

La salinidad y la temperatura son factores sustanciales que manejan la distribución de las especies marinas. Si bien muchos organismos han desarrollado mecanismos de adaptación a variaciones naturales de estas condiciones (Lattemann & Höpner, 2008), ciertas especies, como el plancton unicelular, presentan una baja tolerancia a incrementos de salinidad en su hábitat (Missimer & Maliva, 2018).

Desde una perspectiva ecológica, los organismos marinos, principales receptores del impacto, pueden clasificarse según su movilidad y hábitat en plancton, nekton y bentos (Kress et al., 2020):

- El plancton es un organismo pasivo que presenta un auto movimiento limitado y son arrastrados por corrientes marinas.
- El nekton califica como un organismo activo con movimiento independiente a la corriente.
- Los bentos (organismos bentónicos) se clasifican en sésiles y móviles. Los organismos sésiles se adhieren a rocas o estructuras artificiales, mientras que los organismos móviles se desplazan en el lecho marino.

Los organismos móviles pueden, en general, alejarse de zonas con salinidades elevadas. En contraste, los organismos sésiles, como plantas marinas y corales, presentan una mayor vulnerabilidad frente a estas alteraciones ambientales (Missimer & Maliva, 2018). Un ejemplo representativo es *Posidonia oceánica*, una fanerógama marina endémica del mar Mediterráneo, altamente sensible a perturbaciones ambientales. Diversos estudios han evidenciado que incrementos de salinidad por sobre los valores naturales reducen significativamente su crecimiento; en particular, para salinidades superiores a 38 [psu] se observa una disminución notable del desarrollo de la planta (Capó et al., 2020; Chang, 2015).

Asimismo, cuando la salinidad supera los 50 [psu], el estrés fisiológico generado provoca una mortalidad del 100 % de la especie (Chang, 2015).

2.9. Normativa Ambiental

En la actualidad, existe una amplia normativa ambiental aplicable a este tipo de proyectos, la cual abarca disposiciones de carácter general orientadas a la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y el uso y manejo de los recursos naturales, así como los procesos de fiscalización y la obtención de los permisos ambientales sectoriales necesarios para la ejecución o modificación de proyectos de esta índole.

No obstante, cuando se analizan específicamente las regulaciones de calidad del agua asociadas a las descargas de concentrados de salmuera, se observa que estas son escasas a nivel mundial (Abessi & Roberts, 2018). Dicho esto, a continuación, se presenta la Tabla 2.2 que resume algunas normativas internacionales relacionadas con los valores de salinidad permitidos, según lo tipificado por la *Southern California Coastal Water Research Project*.

Tabla 2.2. Regulaciones internacionales para la descarga de salmuera (adaptado de Abessi & Roberts, 2018).

Región / Autoridad	Límite de Salinidad	Punto de Cumplimiento (relativo a la descarga)	Fuente
Irán DOE	Incremento ≤ 10 %	200 [m]	Ley medioambiental de Irán
Omán	Incremento ≤ 2 [ppt]	Borde de la zona de mezcla	Sultanato de Omán
Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos	Incremento ≤ 5 %	300 [m]	SCCWRP
Carlsbad, California, EE. UU.	Absoluto ≤ 40 [ppt]	300 [m]	San Diego Regional Water Quality Control Board 2006
Huntington Beach, California, EE. UU.	Absoluto ≤ 40 [ppt] salinity (expresada como la dilución de la descarga en un radio de 7.5:1)	300 [m]	Santa Ana Regional Water Quality Control Board 2012
Western Australia/ pautas	Incremento ≤ 5 %	—	—

Región / Autoridad	Límite de Salinidad	Punto de Cumplimiento (relativo a la descarga)	Fuente
Perth, Australia (Western)	Incremento ≤ 1.2 [ppt] a 50 [m] y ≤ 0.8 [ppt] a 1000 [m]	50 [m] y 1000 [m]	SCCWRP
Sydney, Australia	Incremento ≤ 1 [ppt]	50–75 [m]	SCCWRP
Gold Coast, Australia	Incremento ≤ 2 [ppt]	120 [m]	GCD Alliance
Okinawa, Japón	Incremento ≤ 1 [ppt]	Borde de la zona de mezcla	Okinawa Bureau for Enterprises
Estados Unidos (EPA)	Incremento ≤ 4 [ppt]	—	EPA EE. UU.

En Chile, la normativa ambiental se rige principalmente por la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. En su artículo 10°, se establece que los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). En este contexto, el impacto ambiental se define como la alteración del medio ambiente provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad desarrollada en un área determinada.

Este tipo de proyectos se encuentra comprendido dentro de las especificaciones señaladas en la letra O) del artículo 10° de la misma Ley, la cual incluye los proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de aguas o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos y sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos. En consecuencia, estos proyectos solo pueden ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental, debiendo someterse obligatoriamente al SEIA.

El titular del proyecto o actividad que ingresa al SEIA puede hacerlo mediante la presentación de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), de acuerdo con lo establecido en el artículo 11° (Ley 19.300 Sobre Bases Generales Del Medio Ambiente, 2011). Cuando un proyecto o actividad se presenta al SEIA a través de una

DIA, esta debe contener una serie de materias específicas, las cuales se detallan a continuación:

- Una descripción del proyecto o actividad.
- Los antecedentes necesarios que justifiquen la inexistencia de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11° que puedan dar origen a la necesidad de efectuar un EIA.
- La normativa ambiental aplicable y la forma en la que se cumplirá.
- La indicación de los permisos ambientales sectoriales, y los antecedentes asociados a los requisitos y exigencias para el respectivo pronunciamiento.

El Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se encuentra bajo la administración del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), organismo encargado, además, de coordinar a los distintos órganos del Estado que participan en el proceso, con el fin de obtener los permisos y pronunciamientos ambientales correspondientes. Dicho reglamento, establecido mediante el Decreto Supremo N° 40 del año 2013, regula los criterios aplicables para determinar la existencia de los efectos, características o circunstancias señalados en el artículo 11° de la Ley N° 19.300. Asimismo, establece los contenidos mínimos de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y de las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA), el procedimiento de evaluación de ambos instrumentos, las directrices para facilitar la participación ciudadana y la aplicación de las normas de calidad ambiental y de emisión vigentes en Chile. Adicionalmente, el reglamento contempla disposiciones relativas a los planes de seguimiento y fiscalización, los permisos ambientales sectoriales, el seguro ambiental y las autorizaciones provisorias asociadas a los proyectos evaluados (D.S. N°40).

Por su parte, el artículo 142° de la Ley N° 2.222 prohíbe de forma absoluta arrojar lastre, escombros o basuras, así como derramar petróleo, sus derivados o residuos, aguas de relaves, minerales u otras materias nocivas o peligrosas de cualquier especie que ocasionen daños o perjuicios en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, incluyendo puertos, ríos y lagos. No obstante, la Autoridad Marítima podrá autorizar, de conformidad con el reglamento correspondiente, la realización de alguna de las operaciones señaladas, debiendo especificar el lugar y la forma en que estas deberán llevarse a cabo.

En este contexto, el Reglamento sobre Concesiones Marítimas (Armada), establece que los terrenos de playa, la playa propiamente tal, el fondo de mar y las porciones de agua constituyen bienes nacionales de uso público, es decir, patrimonio de todos los chilenos, los cuales pueden ser otorgados en concesión a personas naturales o jurídicas. En consecuencia, toda persona, empresa, organización o servicio público que desee desarrollar un proyecto en estos sectores debe contar previamente con la correspondiente autorización, otorgada por el Ministerio de Defensa Nacional a través de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas. Dicho ministerio posee la facultad privativa de permitir el uso y goce de sectores de terreno de playa fiscal, definidos como los primeros 80 metros medidos desde la línea de más alta marea, así como de la playa, comprendida entre las líneas de baja y alta marea, el fondo marino y las porciones de agua.

Con el fin de regular los aspectos mencionados anteriormente, la Dirección del Territorio Marítimo y de Marina Mercante de Chile (DIRECTEMAR) promulgó la Resolución N° 12.600/679, la cual aprueba y regula materias relacionadas con la gestión ambiental y la autorización del uso de productos químicos en el ámbito marítimo y acuático, estableciendo requisitos para el control de la contaminación y la seguridad. Asimismo, este instrumento normativo faculta la aprobación de circulares, tales como la fijación de la Zona de Protección Litoral (ZPL). Esta corresponde a un ámbito territorial de aplicación de la normativa, definido como la franja de playa, agua y fondo marino adyacente a la costa continental o insular, delimitada por una línea superficial imaginaria medida desde la línea de baja marea de sicigia, la cual se orienta paralelamente a esta y se proyecta verticalmente hasta el fondo del cuerpo de agua, siendo fijada por la Autoridad Marítima.

Los límites máximos permitidos para la descarga de contaminantes y otros residuos líquidos dentro de la Zona de Protección Litoral (ZPL) se encuentran establecidos en la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales, contenida en el Decreto Supremo N° 90.

Dicha norma tiene como objetivo la protección del medio ambiente, con el fin de prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de los contaminantes asociados a los residuos líquidos descargados en estos cuerpos de agua receptores. Para ello, establece las concentraciones máximas permitidas de

contaminantes en los efluentes líquidos que son descargados (D.S N° 90). En la Tabla 2.3 se detallan los límites máximos de concentración permitidos para la descarga de residuos líquidos en cuerpos de agua marinos dentro de la Zona de Protección Litoral (ZPL), establecidos con el fin de regular la cantidad de contaminantes descargados directamente al medio marino.

Tabla 2.3. Límites máximos de Concentración permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales.

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permitido
Aceites y Grasas	[mg/L]	A y G	20
Aluminio	[mg/L]	Al	5
Arsénico	[mg/L]	As	0,5
Boro	[mg/L]	B	0,75
Cadmio	[mg/L]	Cd	0,01
Cianuro	[mg/L]	CN-	0,2
Cloruros	[mg/L]	Cl-	400
Cobre Total	[mg/L]	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	[NMP/100 mL]	Coli/100 mL	1000
Índice de Fenol	[mg/L]	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	[mg/L]	Cr6+	0,05
DBO5	[mg O2/L]	DBO5	35 *
Fósforo	[mg/L]	P	10
Fluoruro	[mg/L]	F-	1,5
Hidrocarburos Fijos	[mg/L]	HF	10
Hierro Disuelto	[mg/L]	Fe	5
Manganeso	[mg/L]	Mn	0,3
Mercurio	[mg/L]	Hg	0,001
Molibdeno	[mg/L]	Mo	1
Níquel	[mg/L]	Ni	0,2
Nitrógeno Total Kjeldahl	[mg/L]	NKT	50
Pentaclorofenol	[mg/L]	C6OHC15	0,009
pH	Unidad	pH	6.0 – 8.5
Plomo	[mg/L]	Pb	0,05
Poder Espumógeno	[mm]	PE	7
Selenio	[mg/L]	Se	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	[mg/L]	SS	80 *
Sulfatos	[mg/L]	SO42-	1000
Sulfuros	[mg/L]	S2-	1
Temperatura	[°C]	T°	35
Tetracloroetano	[mg/L]	C2Cl4	0,04
Tolueno	[mg/L]	C6H5CH3	0,7

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permitido
Triclorometano	[mg/L]	CHCl ₃	0,2
Xileno	[mg/L]	C ₆ H ₄ C ₂ H ₆	0,5
Zinc	[mg/L]	Zn	3

A pesar de regular los límites de descarga de contaminante a aguas marina y continentales superficiales, la legislación en Chile no establece límites relacionados con concentraciones salinas en la descarga de salmuera ni en su entorno.

3. Metodología

En este capítulo se detalla la metodología y procedimiento experimental para comparar la eficiencia de distintas configuraciones de difusores.

3.1. Instalación Experimental

Para la realización de los experimentos, es necesario la creación de un ambiente controlado que permita analizar de forma correcta el comportamiento de la pluma salina. Para esto se solicitó la construcción de una celda transparente cuyas dimensiones son 50 [cm] de ancho, 100 [cm] de largo y 50 [cm] de alto, construida a base de acrílico. El difusor de descarga se encuentra fijo en el interior de la celda acoplado a un soporte que permite cambiar el diseño del difusor para realizar los experimentos. Para impulsar la salmuera hacia el difusor, se emplea una bomba centrífuga acoplada al sistema, la cual succiona el fluido desde un tanque de alimentación con capacidad de 20 [L] que contiene la salmuera. Para regular el caudal de ingreso a la celda se instaló un rotámetro que mide desde 1 hasta 5 [GPM]. De esta forma es posible variar el flujo volumétrico que saldrá por las boquillas del difusor. La instalación antes mencionada se aprecia en la Figura 3.1.

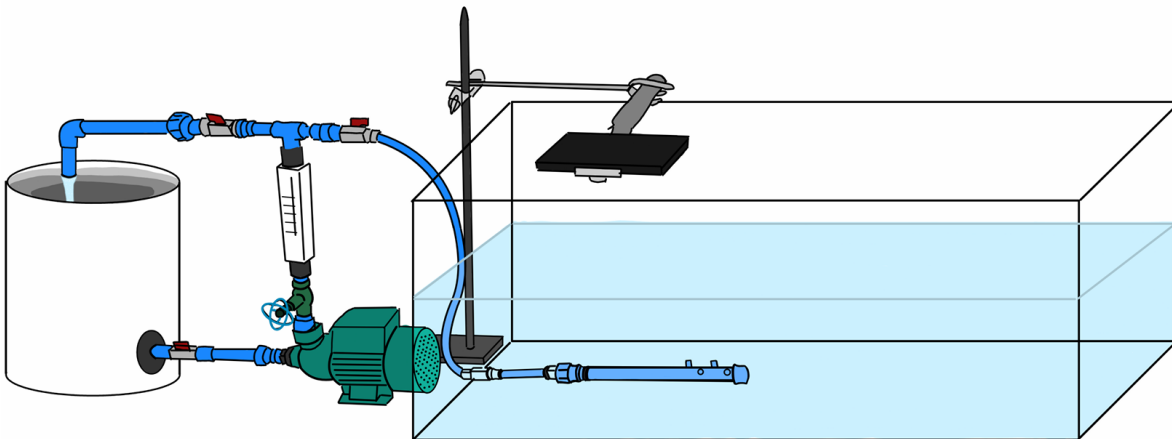


Figura 3.1. Instalación Experimental Descrita (elaboración propia).

Además, la celda cuenta con una entrada de agua mediante una manguera conectada a la red de agua potable, la cual permite llenar la celda para simular un medio receptor estacionario.

Por otra parte, la celda dispone de una salida de líquido que facilita el vaciado de la celda una vez finalizados los experimentos.

Se dispuso una fuente de iluminación junto a una de las paredes laterales de la celda, de modo que la luz incidiera directamente sobre los chorros de salmuera descargados desde las boquillas. En esa misma pared se fijó un papel milimétrico con marcas cada 10 cm, con el objetivo de facilitar la visualización y medición de la altura máxima alcanzada por cada pluma. Adicionalmente, se instaló un soporte universal con una pinza, el cual permitió sostener un estabilizador de cámara para la captura de registros audiovisuales desde la parte superior de la celda.

3.2. Diseño de Experimentos

Se estructuró un Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés *Design of Experiments*), correspondiente a un diseño factorial completo 2^3 . En este diseño se consideraron como factores el diámetro de las portas, el espaciamiento entre ellas y el caudal de descarga. Cada uno de estos factores fue evaluado en dos niveles, lo que permitió analizar tanto los efectos principales como las interacciones entre las variables geométricas e hidráulicas sobre la dilución de la salmuera. En la Tabla 3.1 se aprecia los factores elegidos y los correspondientes niveles que se analizaron.

Tabla 3.1. Factores y niveles del DOE.

Factores	Niveles	
	Bajo (-)	Alto (+)
Diámetro de porta	0,5 [cm]	0,8 [cm]
Espaciamiento entre portas	4 [cm]	8 [cm]
Caudal de Descarga	3,5 [L/min]	4,4 [L/min]

Si bien la teoría indica que el comportamiento del chorro depende principalmente del número de Froude densimétrico y del parámetro $L_p/(DF_d)$, en el presente estudio se adoptó un

enfoque experimental basado en variables geométricas e hidráulicas directamente controlables (diámetro de porta, espaciamento y caudal), con el fin de evaluar su efecto combinado sobre la dilución. De esta forma el diseño experimental completo es el que se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Diseño Experimental Factorial completo.

Experimento	L_p [cm]	D [cm]	Q [L/min]
1	4	0,5	4,4
2	4	0,5	3,5
3	4	0,8	4,4
4	4	0,8	3,5
5	8	0,5	4,4
6	8	0,5	3,5
7	8	0,8	4,4
8	8	0,8	3,5

El modelo estadístico mediante el cual se analizaron los factores más significativos, así como también se determinaron las interacciones más importantes, se encuentra definido por la Ecuación (3.2).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum \sum_{j<i} \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad (3.1)$$

La cual, al ser desarrollada, da como resultado el modelo presentado mediante la Ecuación (3.2).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.2)$$

En donde la variable de respuesta Y corresponde a $C(x, t)$, es decir, la concentración medida a una distancia fija desde la boquilla sobre el eje axial y en un instante de tiempo determinado. Esta definición se adopta con el fin de evaluar la concentración bajo las mismas condiciones en todos los experimentos, permitiendo así una comparación directa entre ellos. Para este estudio, la distancia considerada desde la boquilla es de 20 [cm], mientras que el tiempo de medición corresponde a 2 segundos desde la descarga de la pluma.

3.3. Diseño del Difusor

Una vez realizado el diseño experimental, se consideraron las variables a medir para la fabricación de los difusores. Se crearon 4 diferentes tipos de difusores, que varían en el diámetro de la boquilla y el espaciamiento entre boquillas. Esto con el fin de cumplir con los parámetros que influyen en el proceso de descarga analizado. En la Tabla 3.3 se presentan las características de cada difusor diseñado.

Tabla 3.3. Diseño de difusores para prueba experimental.

Diseño	D [cm]	L_p [cm]
Difusor 1	0,5	4
Difusor 2	0,8	4
Difusor 3	0,5	8
Difusor 4	0,8	8

Se empleó PVC como material principal para la fabricación de los difusores, los cuales contaban con cuatro portas cada uno, dispuestas en pares a ambos lados del difusor. Las boquillas fueron instaladas a presión y selladas con silicona, con el fin de evitar filtraciones de salmuera. Cada boquilla fue orientada de manera que el ángulo de descarga respecto de la horizontal fuese de 60° , cumpliendo así con el estándar comúnmente adoptado en el diseño

de difusores. La configuración antes descrita se aprecia de mejor forma en la Figura 3.2, donde se aprecia de izquierda a derecha los difusores empleados en el diseño experimental.

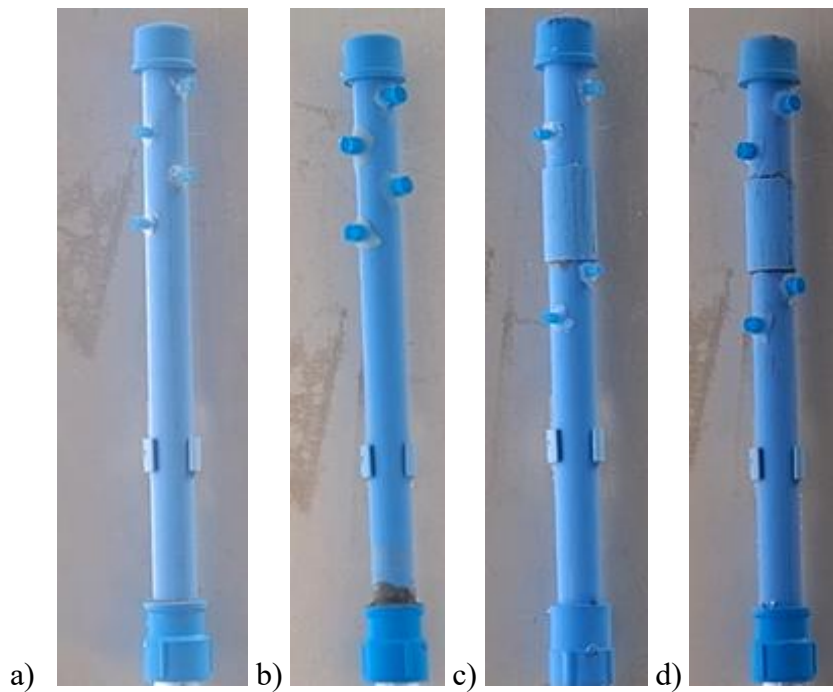


Figura 3.2. Difusores diseñados para la prueba experimental. (a) Diseño 1: Espaciamiento de 4 [cm] y diámetro de boquilla de 5 [mm], (b) espaciamiento de 4 [cm] y diámetro de 8 [mm], (c) espaciamiento de 8 [cm] y diámetro de 5 [mm], (d) espaciamiento de 8 [cm] y diámetro de 8 [mm].

Dado que cada difusor cuenta con cuatro boquillas, el caudal total se distribuye teóricamente de manera equitativa entre ellas. En consecuencia, los caudales considerados en el diseño experimental, presentados en la Tabla 3.2, corresponden al caudal total de ingreso al difusor y no al caudal que descarga cada boquilla de forma individual. Por lo tanto, el caudal efectivo que atraviesa cada boquilla es igual a $Q/4$.

3.4. Descripción del procedimiento experimental

El procedimiento experimental que se llevó a cabo consistió en la preparación de la salmuera necesaria para cumpliera con el comportamiento físico de la descarga. Para esto se creó una diferencia de densidad añadiendo sal de mesa al agua de grifo, donde por cada 5 [L] de agua dulce, se añadieron 180 [g] de sal de mesa que permitió crear una diferencia de densidad nominal inicial de 2,5 % (Lai & Lee, 2012). En base a esto, permitió que la mayoría de los experimentos cumplieran con la condición de $Re > \sim 2.000$ y de $F_d > \sim 5$. Además, se añadió

colorante vegetal color calipso en una proporción de 16 gotas por litro (Aguirre et al., 2025), para diferenciar el chorro de descarga del medio circundante.

La densidad de las soluciones fue medida mediante un densímetro de flotación cada vez que se realizaba la experiencia, junto con la medición de la temperatura con un termómetro de vidrio. Una propiedad importante que cabe destacar es la viscosidad cinemática (ν), un parámetro importante a la hora de determinar el Reynolds. Esta propiedad depende de la viscosidad dinámica y la densidad ($\nu = \mu/\rho$). Debido a las limitaciones en la medición de la viscosidad dinámica, se asume de la viscosidad de la solución de salmuera en un valor de $1,062 \times 10^{-3}$ [Pa · s], para una temperatura de 20 [°C] y 30.000 [ppm] (El-Dessouky & Ettouney, 2002). Dado que la temperatura medida para las soluciones empleadas fue de 18 [°C], la aproximación anterior es válida dado que, en el rango de 15–20 [°C], la variación de la viscosidad es prácticamente lineal y del orden de un 2–3 % por cada 2 [°C], lo que no altera el régimen de flujo ni las relaciones de escala empleadas, considerando que el sistema opera en régimen plenamente turbulento ($Re > 2.000$). En la Tabla 3.4 se aprecian las propiedades de la salmuera preparada y el agua potable utilizada.

Tabla 3.4. Propiedades de las soluciones empleadas.

Solución	Densidad [g/cm³]	Temperatura [°C]	ν [m²/s]
Salmuera preparada	1,028	18	$1,024 \times 10^{-6}$
Agua potable	1,002	18	$1,051 \times 10^{-6}$

Una vez preparada la solución de salmuera, esta se vertió en el tanque de alimentación y se procedió a la preparación de la instalación experimental. Un aspecto relevante del experimento es la velocidad de salida del chorro en la boquilla, para la cual no se dispone de instrumentos de medición directa en dicho punto. Con el fin de resolver esta limitación, se realizó una calibración del rotámetro para cuantificar el caudal real que ingresa al difusor.

Para ello, se llevaron a cabo mediciones mediante aforo volumétrico para cinco caudales distintos, comprendidos entre 1 y 5 [GPM]. En cada caso se registraron valores tanto durante

la apertura como en el cierre de la válvula, obteniéndose un total de cuatro mediciones por condición experimental. Esto permitió relacionar caudal indicado por el rotámetro en [GMP], con el caudal real que ingresa al difusor en [L/min]. En la Figura 3.3 se aprecia la regresión aplicada a los puntos experimentales.

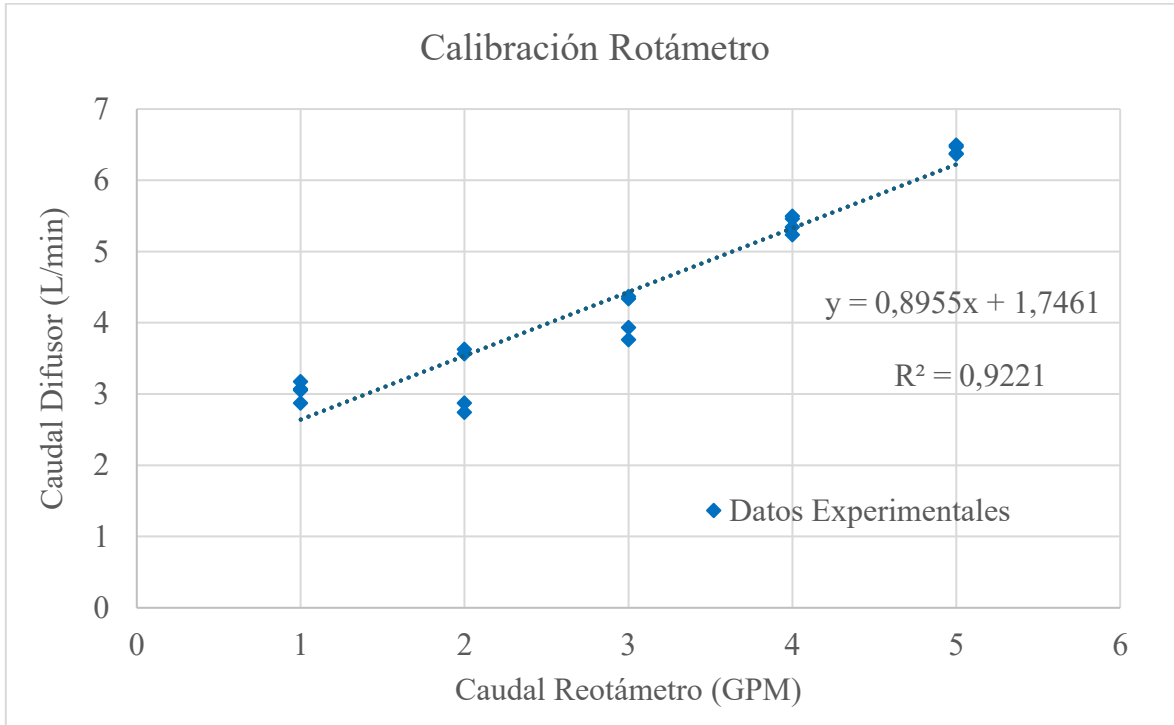


Figura 3.3. calibración y regresión para determinación de caudal real.

Con la cuantificación real del flujo volumétrico que ingresa al difusor, se determina la velocidad de chorro a partir de la Ecuación (2.11), considerando las 4 boquillas y asumiendo la distribución equitativa, la expresión queda modificada de la siguiente forma:

$$u = \frac{Q}{\pi D^2} \tag{3.3}$$

Una vez determinadas las velocidades, se procedió a la obtención de las imágenes a partir de la cámara del Samsung A54 con una resolución de 3840×2160 pixeles y una captura de 30 fotogramas por segundo. Como ya se mencionó anteriormente, se grabaron videos desde la parte superior de la celda con la ayuda de un estabilizador para la cámara, lo que limitó problemas por ruido de movimiento. Adicional a la obtención de las imágenes, se recopiló la

altura alcanzada por cada pluma al realizar el experimento. Por cada experimento se realizó triplicado, esto con el fin de minimizar el error en la medición.

3.5. Análisis de Datos

Con las imágenes recopiladas se realiza el procesamiento de los registros experimentales mediante un código desarrollado en el *software* MATLAB, cuyo objetivo es analizar la evolución espacial y temporal de las plumas salinas descargadas. En primer lugar, se define el archivo de video correspondiente al experimento analizado y se define el número de fotogramas a procesar, lo que permite reducir la carga computacional de salto de *frames*. Además, se realiza una calibración espacial que permite relacionar la distancia real con la resolución del video mediante un factor de conversión de píxeles a centímetros. Para ello, el usuario debe trazar una línea recta sobre una referencia de longitud conocida en la imagen y asociar su valor real, tal como se muestra en la Figura 3.4. Esto permite convertir las mediciones obtenidas pasando del dominio de las imágenes a magnitudes físicas. Dentro del código se definen los parámetros de salinidad del sistema, incluyendo la salinidad de la salmuera descargada, correspondiente a 36 [g/L] y la salinidad del medio receptor, aproximadamente de 0 [g/L].



Figura 3.4. Calibración espacial para el procesamiento del video.

Una vez realizada la calibración espacial, el código solicita al usuario definir pequeñas ventanas de análisis sobre las boquillas del difusor para detectar de forma más precisa el color asociado a la solución concentrada. Esto se define para ambos chorros y permite generar un perfil representativo del fenómeno físico. En la Figura 3.5, se aprecia un ejemplo de las ventanas de análisis definidas, representadas por los colores amarillo y rosado.



Figura 3.5. Ventanas de análisis sobre las boquillas del difusor.

Se realiza una definición de las regiones de interés (ROI), en donde a partir de un fotograma de referencia extraído del video, se selecciona de forma interactiva las regiones de interés correspondientes a los chorros del lado izquierdo y derecho del difusor. Las regiones definidas permiten aislar espacialmente cada pluma, evitando interferencias entre los chorros. En la Figura 3.6 se aprecia la definición de las regiones de interés para cada chorro, donde los rectángulos de color verde y azul representan las zonas de interés seleccionadas.

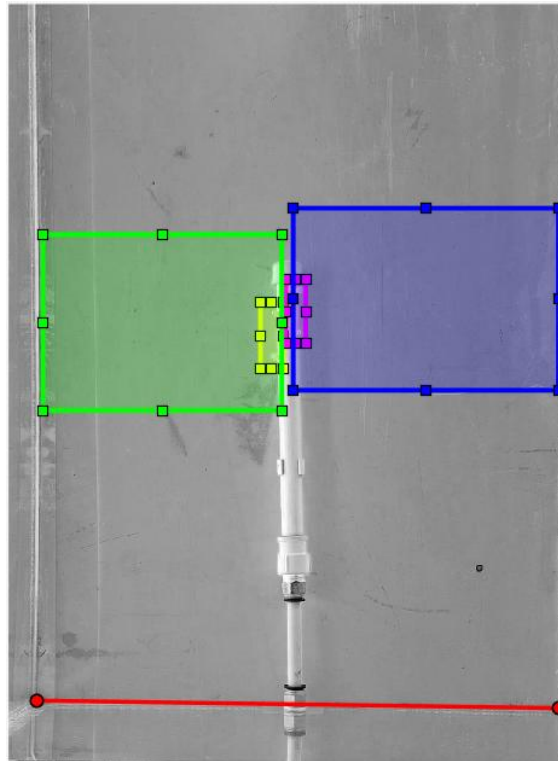


Figura 3.6. Definición de las regiones de interés.

Luego de definir las áreas, se debe identificar el intervalo temporal desde que el chorro comienza a salir de la boquilla hasta que se comienza a saturar el medio. En este punto se extrae la señal de intensidad promedio del canal verde, la cual es la que más contraste logra entre el fondo y la pluma, en los puntos centrales de cada región de interés.

Esta señal se evalúa a lo largo del tiempo, permitiendo visualizar la evolución temporal de la intensidad luminosa asociada a cada chorro. Con esta información, se selecciona el fotograma de inicio y de fin, para definir el intervalo temporal que será considerado para el análisis. La ventana de selección de intervalo se presenta en la Figura 3.7 mediante una gráfica en la cual se aprecia la intensidad en función del número de fotograma.

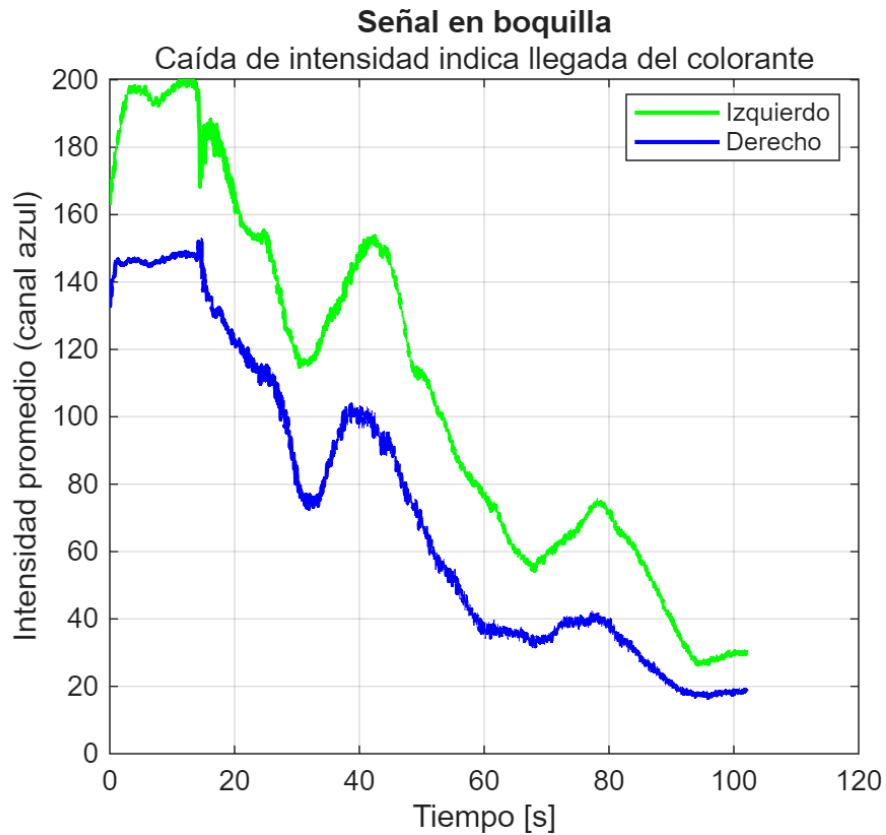


Figura 3.7. Evolución temporal de la intensidad.

Una vez determinado el intervalo, se procede al cálculo de las intensidades características del sistema. En primer lugar, se estima la intensidad base I_0 , correspondiente al campo sin la presencia de salmuera, mediante el promedio de los primeros fotogramas del video. Posteriormente, se calcula la intensidad media I_M para cada región de interés, promediando los fotogramas comprendidos entre el inicio y el fin del intervalo de tiempo. Con ambas intensidades se aplica el método de corrección de atenuación de luz basado en la ley de Lambert-Beer, la cual relaciona la intensidad de luz transmitida con la concentración de una sustancia, como se aprecia en la Ecuación (3.4)

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon \cdot C \cdot L \quad (3.4)$$

En donde A corresponde a la absorbancia, ε corresponde al coeficiente de extinción, C corresponde a la concentración y L corresponde a la longitud del trayecto óptico. Una vez que se determina I_0 e I_M , el código calcula la absorbancia mediante la Ecuación (3.4), y luego se realiza una conversión a concentración. Debido a que se desconoce el coeficiente de

extinción y el trayecto óptico no se encuentra bien definido, se aplicó una normalización relativa a la concentración, la cual se expresa mediante la Ecuación (3.5).

$$C = \frac{A}{A_{max}} \cdot (C_0 - C_a) + C_a \quad (3.5)$$

En donde se emplea la Absorbancia máxima observada, la concentración del chorro C_0 y la concentración del ambiente C_a . Para asegurar que se genere un perfil de concentración asociado al eje axial de cada pluma, se determinan de forma manual, como se aprecia en la Figura 3.8

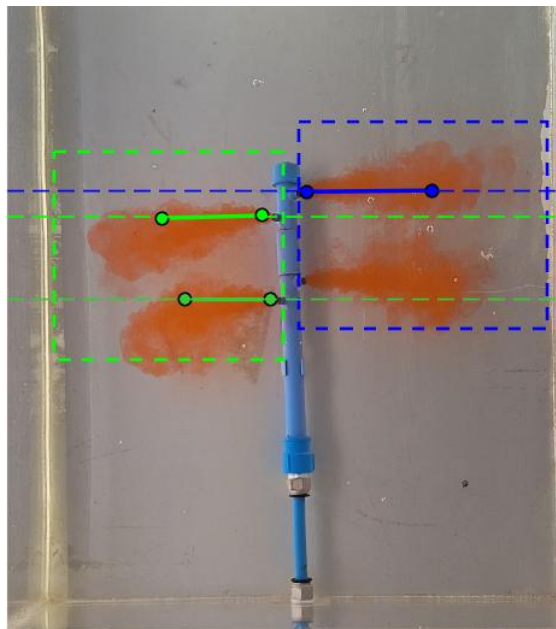


Figura 3.8. Trazado de ejes para determinación de perfiles de concentración.

De esta forma se transformó de absorbancia a concentración y se generaron mapas de absorbancia para cada pluma definida anteriormente. Además de esto, el código generó gráficas de dilución axial de los cuatro chorros visibles.

4. Análisis de Resultados

4.1. Comportamiento de la Altura de la Pluma

Parte de las mediciones registradas al momento de realizar los experimentos correspondió a la cuantificación de la altura de la pluma, en donde se midió tanto para el chorro izquierdo como para el chorro derecho. En la Figura 4.1 se presentan los valores obtenidos a partir del promedio de los duplicados realizados por condición de experimento para los casos donde el espaciado entre las portas fue de 4 [cm], en donde se compara con el valor teórico de altura obtenido a partir de la Ecuación (2.21).

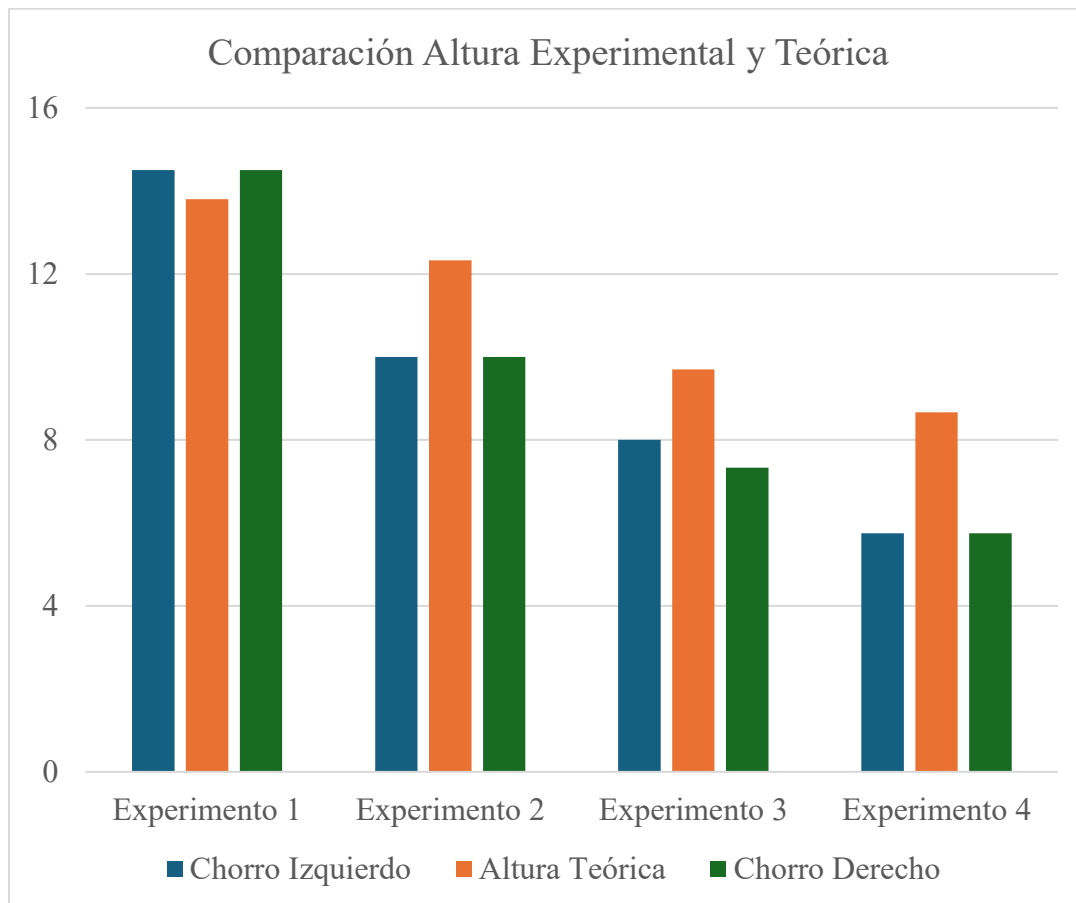


Figura 4.1. Comparación visual de las alturas experimentales obtenidas con respecto a la teórica para el caso de espaciado entre portas de 4 [cm].

A partir de la figura anterior se observa una clara tendencia a desviarse del valor teórico. El experimento 1, correspondiente a un diámetro de 0,5 [cm] y un caudal de ingreso al difusor de 4,4 [L/min], es la que presenta la mayor cercanía en magnitud respecto a dicho valor. En el resto de las condiciones analizadas se evidencia una disminución respecto del valor predicho. Para complementar el análisis, se determinó el error experimental asociado a cada medición respecto del valor teórico para ambos chorros, como se puede observar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Tabla comparativa de Alturas Experimentales y Teóricas obtenida para el caso de espaciamiento de 4 [cm].

Experimento		% Error Experimental Chorro izquierdo	% Error experimental Chorro derecho
1	D = 0,5 [cm] Q = 4,4 [L/min]	-5,1	-5,1
2	D = 0,5 [cm] Q = 3,5 [L/min]	18,9	18,9
3	D = 0,8 [cm] Q = 4,4 [L/min]	24,4	17,5
4	D = 0,8 [cm] Q = 3,5 [L/min]	33,6	33,6

De la tabla se aprecia un error de -5,1% para el experimento 1, siendo el único valor representativo que cumple con la fenomenología predicha. Para los experimentos 2 y 3, el error experimental es inferior al 20%, considerándose aceptable dentro de la fenomenología de chorros densos. En cuanto al experimento 4, el error experimental es superior al 30%, siendo poco representativo de la fenomenología.

De la misma forma, en la Figura 4.2 se presentan los valores obtenidos a partir del promedio de los duplicados realizados por condición de experimento para los casos donde el espaciamiento entre las portas fue de 8 [cm], en donde se compara con el valor teórico de altura.

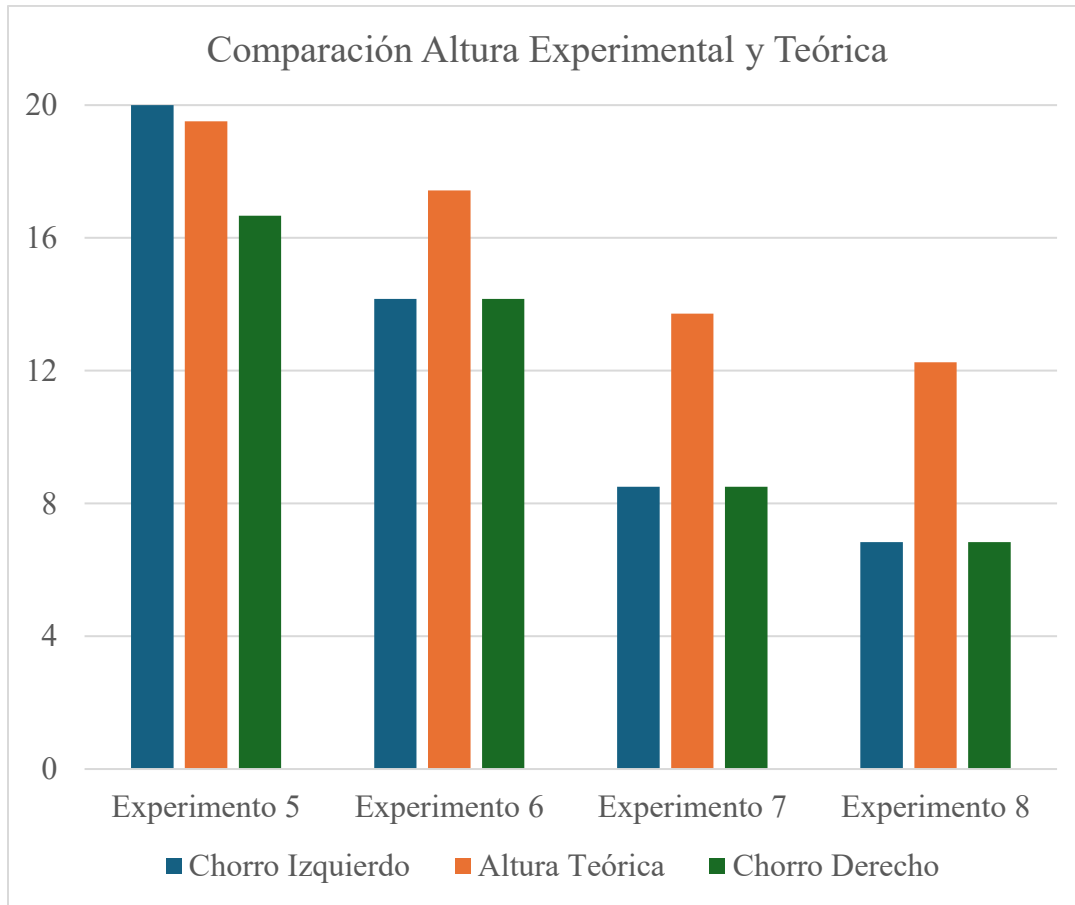


Figura 4.2. Comparación visual de las alturas experimentales obtenidas con respecto a la teórica para el caso de espaciado entre portas de 8 [cm].

Al igual que en el caso anterior, la Figura 4.2 evidencia una clara tendencia a desviarse del valor teórico, en donde se puede observar que para la condición 1 existe una disparidad entre la altura alcanzada por el chorro izquierdo y el chorro derecho. De igual forma, las demás condiciones analizadas evidencian marcada disminución con respecto al valor predicho. Asimismo, se determinó el error experimental asociado a cada medición respecto del valor teórico para ambos chorros, como se puede observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Tabla comparativa de Alturas Experimentales y Teóricas obtenida para el caso de espaciamiento de 8 [cm].

Experimento		% Error Experimental Chorro izquierdo	% Error experimental Chorro derecho
5	D = 0,5 [cm] Q = 4,4 [L/min]	-2,5	14,6
6	D = 0,5 [cm] Q = 3,5 [L/min]	18,7	18,7

Experimento		% Error	% Error
		Experimental Chorro izquierdo	experimental Chorro derecho
7	D = 0,8 [cm] Q =4,4 [L/min]	38,0	38,0
8	D = 0,8 [cm] Q =3,5 [L/min]	44,2	44,2

De la tabla anterior se aprecia una diferencia significativa entre el error experimental del chorro izquierdo y el derecho para el experimento 5. Se evidencia que el chorro izquierdo es el único valor representativo de la fenomenología asociada a la descarga. En cuanto al experimento 6, se aprecia que su error experimental es inferior al 20%, por lo que puede ser aceptable por la fenomenología de las plumas salinas estudiadas. Por su parte, los experimentos 7 y 8 presentan un error significativo superior al 35%, por lo que se deben analizar los factores asociados.

4.2. Respuesta de la Dilución Axial

Mediante el código de MATLAB, se obtuvieron diversas gráficas que permiten comprender como se produce la dilución axial del chorro una vez que salga de la boquilla. Para velocidades altas de salida desde la boquilla, es esperable que se alcance mayor dilución, debido a los efectos de dilución turbulenta. Los casos en los que se presentan mayores velocidades son experimentos 1 y 5, con velocidades de salida de 0,94 [m/s], y los experimentos 3 y 7, con velocidades de salida de 0,36 [m/s]. A modo de ejemplo, los perfiles que se presentarán a continuación son extraídos a partir de diferentes frames (o instantes de tiempo), para determinar hasta donde llegó la pluma en dicho instante y cuál es su perfil de concentración. Esto se puede apreciar en la Figura 4.3, la cual se entrega como ejemplo y corresponde a la pluma analizada para el experimento 8.

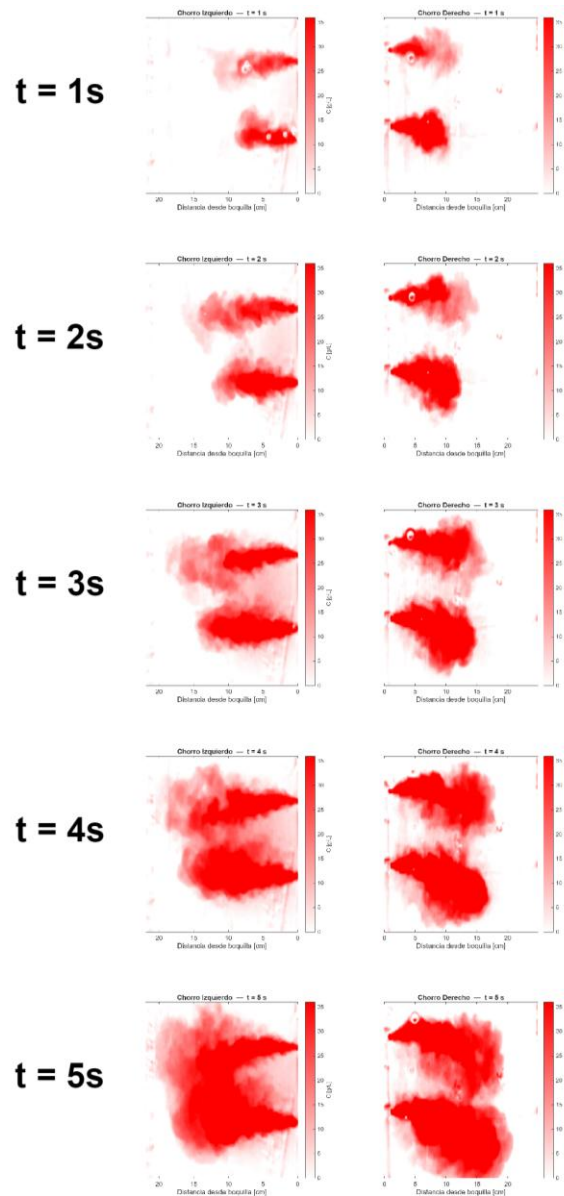


Figura 4.3. Pluma en desarrollo presentada en diferentes instantes de tiempo.

En la Figura 4.4, correspondiente al experimento 1, se aprecian cuatro gráficos que representan los perfiles de concentración asociados a las plumas generadas por las cuatro boquillas. Se puede observar como la curva de concentración correspondiente al instante de tiempo de 1 segundo alcanza un valor cercano a 0 cuando la distancia desde la boquilla equivale a 20 [cm], mientras que, para los demás instantes de tiempo, la concentración no alcanza a diluirse, sobre todo para los instantes superiores a 3 segundos, quedando en valores superiores a 25 [g/L].

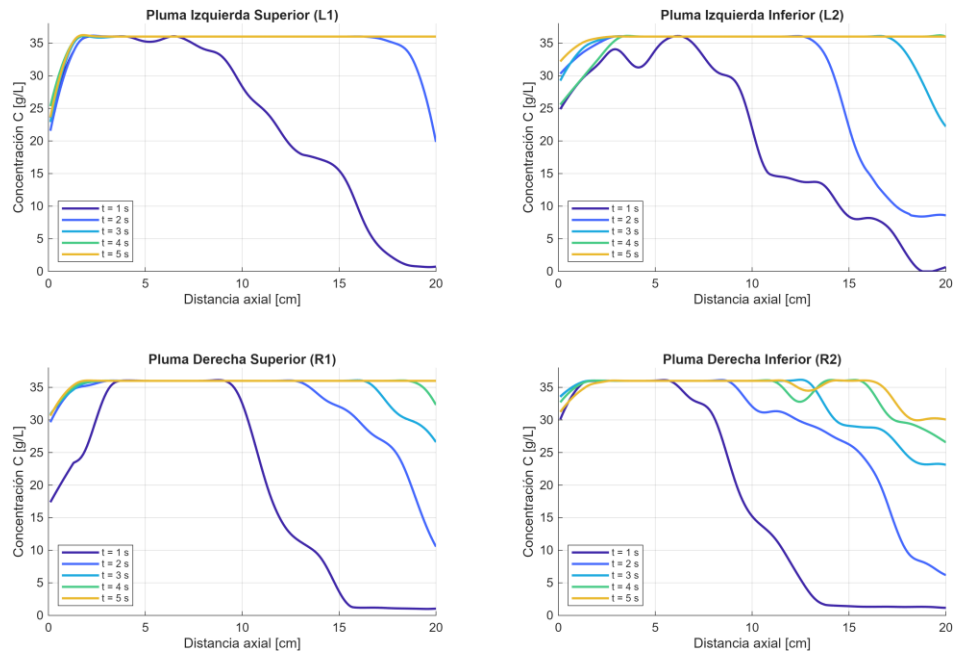


Figura 4.4. Dilución Axial del Experimento 1.

En la Figura 4.5, correspondiente al experimento 2, evidencia un aumento en la dilución respecto a los perfiles vistos anteriormente. Pasados los 15 cm desde la boquilla, los primeros 2 instantes de tiempo presentan una disminución significativa de la concentración, los cuales se aprecian de mejor manera en las plumas del lado derecho del difusor. Por lo que, al disminuir el caudal de operación, la dilución se vio favorecida.

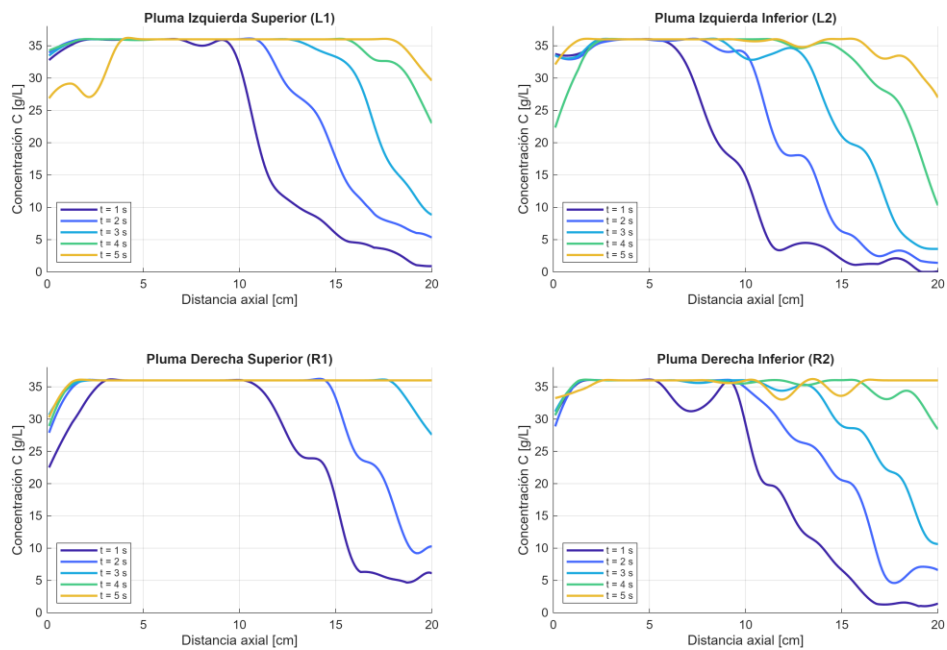


Figura 4.5. Dilución Axial del Experimento 2.

Respecto a la Figura 4.6, el experimento 3 presentaba un mayor diámetro de boquilla respecto a los experimentos 1 y 2, evidenciando una disminución en la concentración considerable al llegar a los 20 cm desde la salida de la boquilla para los cinco instantes de tiempo.

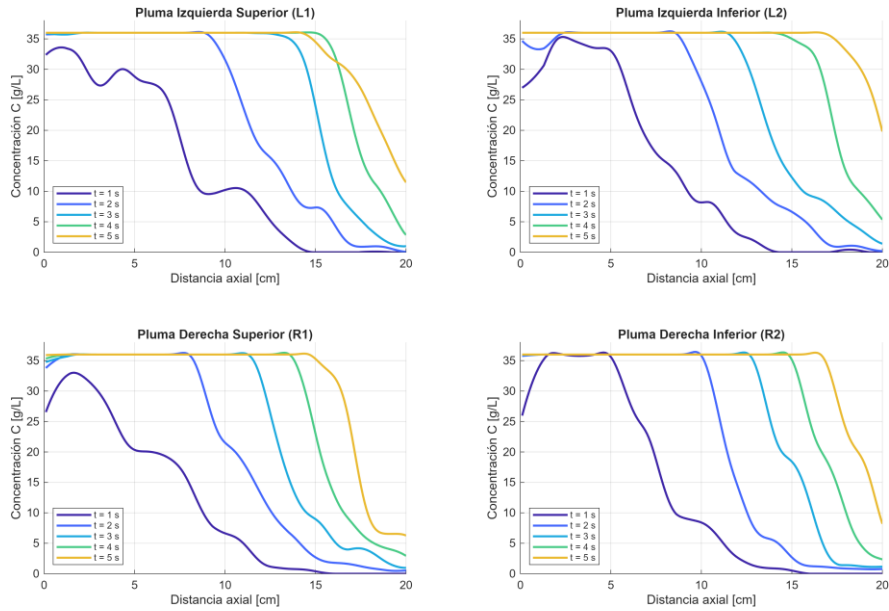


Figura 4.6. Dilución Axial del Experimento 3.

En tanto, la Figura 4.7 presenta un aumento significativo en la dilución para ambos chorros pasados los 15 cm desde la boquilla, siendo similar al experimento 3. La concentración alcanza valores cercanos a 0 para todos los instantes de tiempo.

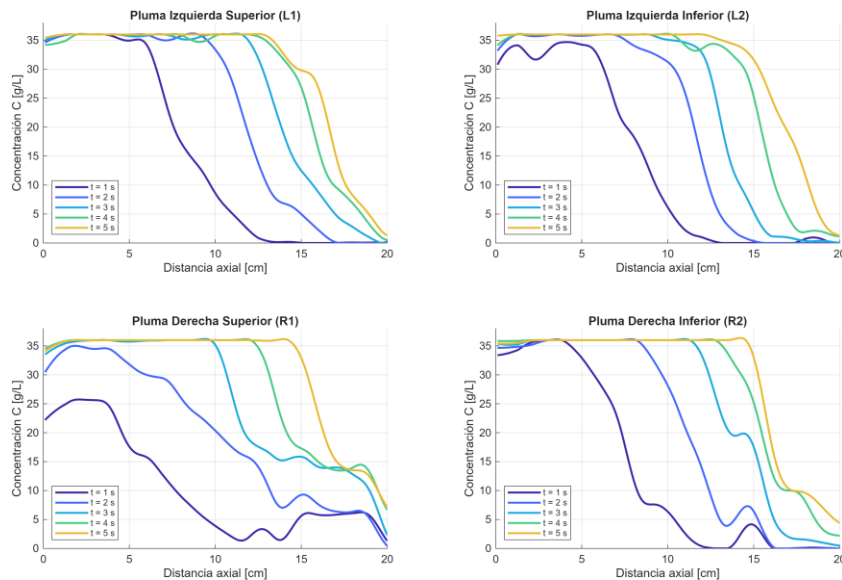


Figura 4.7. Dilución Axial del Experimento 4.

En cuanto a los experimentos 5 y 6, el comportamiento es similar al de los experimentos 1 y 2 en donde la disminución significativa solo se aprecia para el instante de tiempo de 1 segundo, y a una distancia superior a los 15 cm desde la boquilla. Esto se puede deber principalmente a la alta velocidad de salida de estos experimentos y la limitación de visualización en la instalación experimental. Lo dicho anteriormente se aprecia en la Figura 4.8 y en la Figura 4.9, respectivamente.

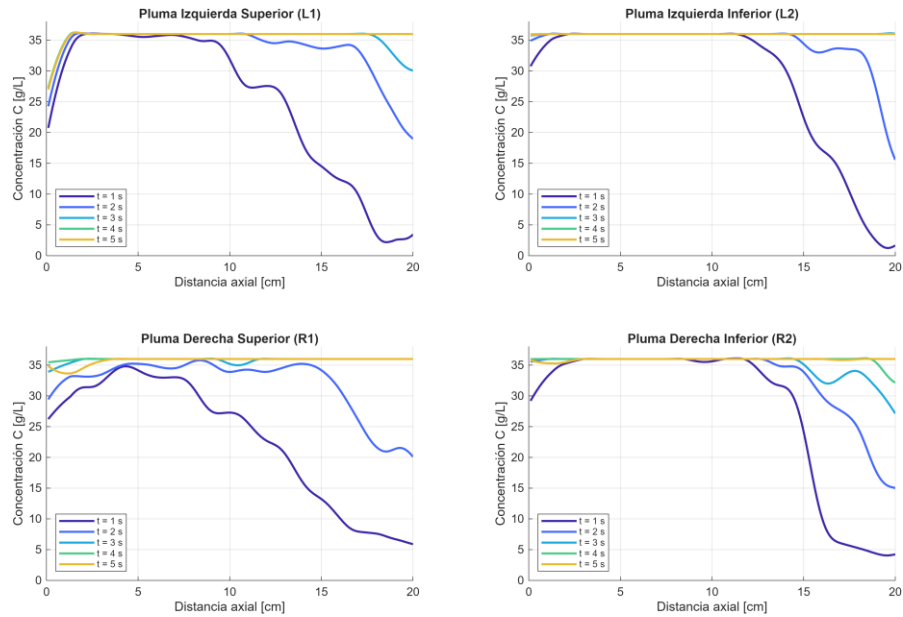


Figura 4.8. Dilución Axial del Experimento 5.

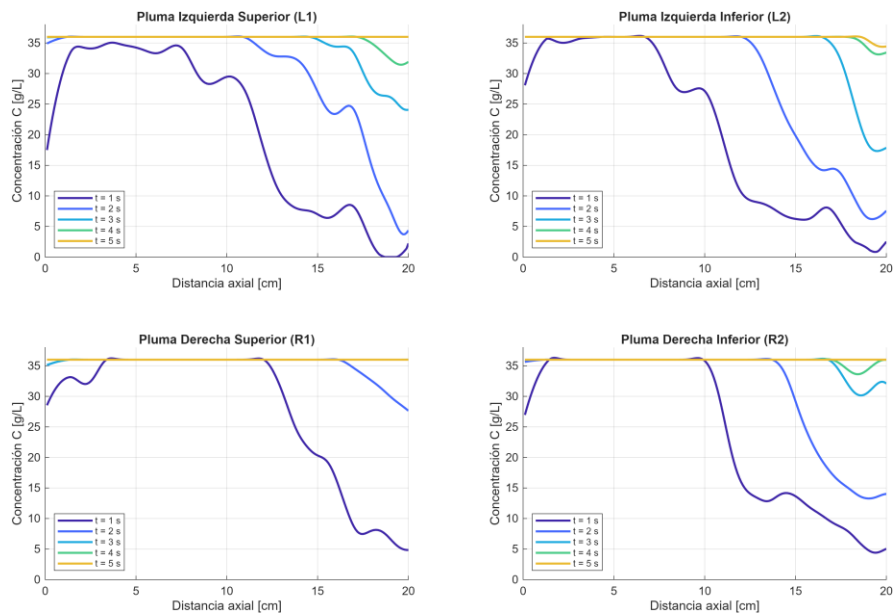


Figura 4.9. Dilución Axial del Experimento 6.

Finalmente, en la Figura 4.10 se aprecia un perfil de concentración muy marcado, en donde se alcanzan valores cercanos a 0 para la mayor parte de los instantes, siendo los perfiles esperables para este tipo de análisis. Se aprecia como las curvas parten desde la concentración máxima, al salir de la boquilla, y como a medida que avanza el tiempo y la distancia, se va produciendo la dilución hasta alcanzar valores de 0. Esto también se puede apreciar de buena forma en la Figura 4.11, siendo independiente del caudal de operación utilizado.

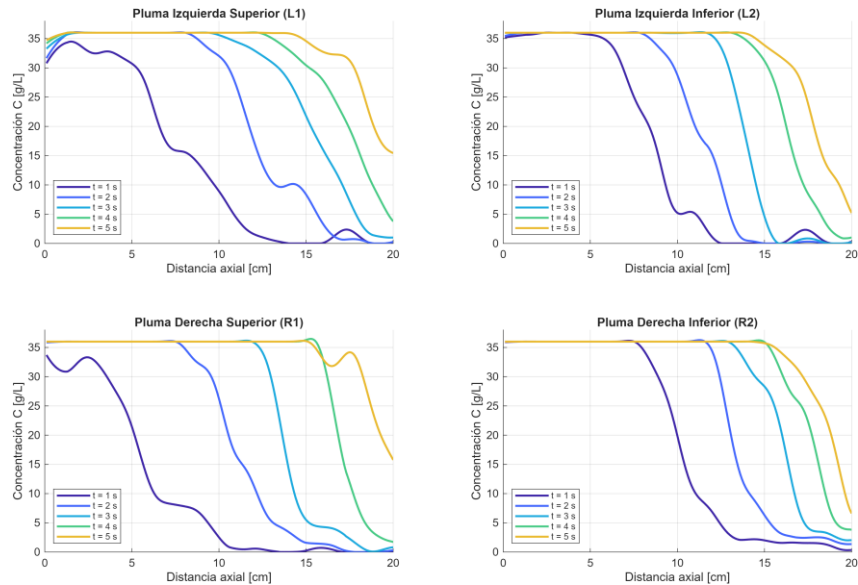


Figura 4.10. Dilución Axial del Experimento 7.

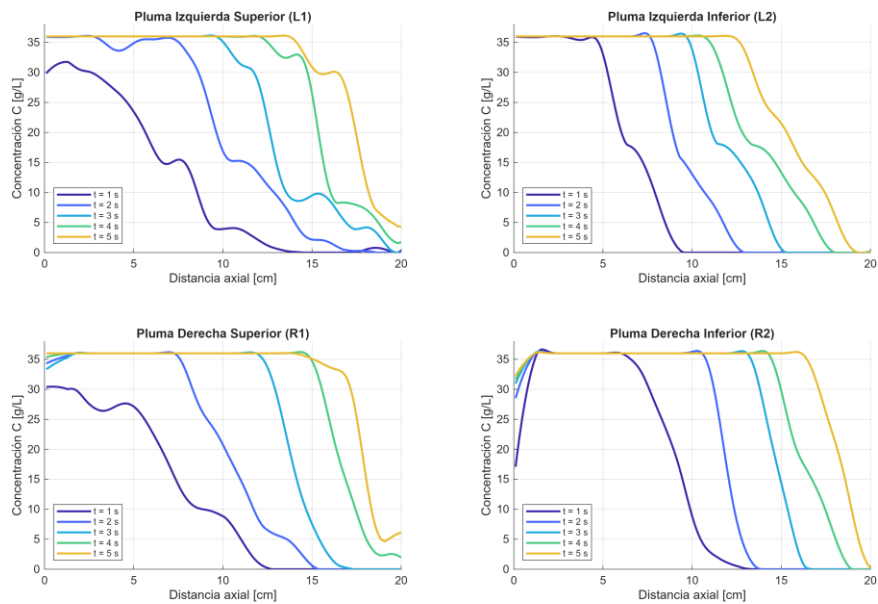


Figura 4.11. Dilución Axial del Experimento 8.

4.3. Respuesta del Modelo Planteado

A partir del procesamiento de imágenes, se obtuvieron valores de dilución para cada experimento del diseño aplicado los cuales se aprecian en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores obtenidos de dilución para cada experimento.

Experimento	Concentración
1	11,2
2	4,6
3	0,0
4	0,0
5	14,6
6	12,8
7	0,3
8	0,0
9	7,5
10	7,2
11	0,8
12	0,4
13	20,3
14	14,0
15	1,1
16	0,0

Se obtuvieron los parámetros del modelo de la Ecuación (3.2), a partir de un desarrollo matricial como se muestra en la Ecuación (4.1).

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4.1)$$

En donde X corresponde a la matriz de diseño del modelo, la matriz Y corresponde a la matriz de respuesta, siendo los valores de dilución de obtenidos para cada experimento y β corresponde a la matriz de parámetros del modelo. La matriz de diseño se obtiene a partir de los factores y niveles descritos en la Tabla 3.1. Los niveles de cada factor son codificados mediante la Ecuación (4.2).

$$X_{\text{codificado}} = \frac{\text{Valor} - P_m}{\frac{\text{Rango}}{2}} \quad (4.2)$$

Donde el P_m corresponde al punto medio entre el nivel alto y el nivel bajo, mientras que el *Rango* es la diferencia entre ambos niveles. Gracias a esto, se obtiene la siguiente matriz de diseño, en donde se aprecian los efectos principales y sus interacciones, los cuales se pueden observar en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Matriz de diseño.

Corrida	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
9	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
10	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
13	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
15	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
16	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1

De modo que utilizando la Ecuación (4.1), se obtienen los siguientes parámetros β del modelo que son presentados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Valores de los parámetros e interacciones del modelo.

Parámetro	Valor
β_I	5,9
β_A	-2,0
β_B	-5,6
β_C	1,0
β_{AB}	1,9
β_{AC}	-0,1
β_{BC}	-0,8
β_{ABC}	0,0

Para determinar la significancia de los parámetros y de sus interacciones, se propone un test de hipótesis tal que:

$H_0: \hat{\beta}_i = 0 \rightarrow$ Hipótesis Nula: el parámetro no es significativo.

$H_1: \hat{\beta}_i \neq 0 \rightarrow$ Hipótesis Alternativa: el parámetro es significativo.

Se rechaza o no la hipótesis nula al comparar el valor del parámetro obtenido con el valor del factor del intervalo de confianza. En primer lugar, se calculó el error puro a partir de los duplicados. Se estimó la varianza del error puro, considerando la diferencia entre el valor Y del modelo y el promedio del duplicado, como se aprecia en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Estimación de la varianza del error puro

Y	$Y_{promedio}$	Diferencia
11,2	9,4	1,8
7,5	9,4	-1,8
4,6	5,9	-1,3
7,2	5,9	1,3
0,0	0,4	-0,4
0,8	0,4	0,4
0,0	0,2	-0,2
0,4	0,2	0,2
14,6	17,4	-2,8
20,3	17,4	2,8
12,8	13,4	-0,6
14,0	13,4	0,6
0,3	0,7	-0,4
1,1	0,7	0,4
0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0
	SS	27,6
	G.L	8,0
	Sy2	3,4

La varianza del error puro se calculó a partir del cociente entre la suma de los cuadrados de la diferencia y los grados de libertad, que en este caso corresponden a 8. El factor del intervalo de confianza representa el margen de error del parámetro, y se calcula considerando el valor de la diagonal de la matriz de diseño multiplicado por la raíz de la varianza del error puro por el valor t . De esta forma se obtiene la significancia presentada en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Significancia de los parámetros e interacciones del modelo.

Parámetro	Valor	Significancia
β_I	5,9	SI
β_A	-2,0	SI
β_B	-5,6	SI
β_C	1,0	SI
β_{AB}	1,9	SI
β_{AC}	-0,1	NO
β_{BC}	-0,8	NO
β_{ABC}	0,0	NO

4.4. Escalabilidad del Modelo

Con el fin de evaluar la escalabilidad del modelo, se seleccionó uno de los cuatro diseños propuestos, considerando los resultados experimentales asociados a la eficiencia de dilución obtenida. En base a la significancia de los factores del diseño experimental, y de los valores de concentración medidos sobre el eje de la pluma descargada, el difusor que presentó una mayor eficiencia corresponde al difusor 4, cuyas características se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Difusor elegido.

Diseño	D [cm]	L_p [cm]
Difusor 4	0,8	8

Para analizar la escalabilidad, debemos basarnos en la similitud del número de Froude densimétrico, que como ya se mencionó anteriormente, garantiza que la relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales sea equivalente en el modelo y el prototipo:

$$Fr^P = Fr^M \quad (4.3)$$

Entonces, para escalar el diseño del difusor, se debe mantener constante el valor del número de Froude, siendo de 8,1 para el modelo. Debido a esto, se empleó la siguiente expresión:

$$Fr^P = 8,1 = \frac{u^P}{\sqrt{g_0'^P d^P}} \quad (4.4)$$

En donde u^P corresponde a la velocidad real del prototipo, $g_0'^P$ corresponde a la aceleración de gravedad modificada que considera las densidades reales de los prototipos a escala 1:1, y d^P corresponde al diámetro real de un difusor marino. A partir de las propiedades reales, presentadas en la

Tabla 4.9. Propiedades de descarga reales.

Propiedades	Valor
Velocidad de Descarga	10 [m/s]
Densidad medio receptor	1026,07 [kg/m ³]
Densidad salmuera	1053,95 [kg/m ³]

Reemplazando los valores en la Ecuación (4.4) e igualando el número de Froude densimétrico al del modelo para despejar el diámetro, se obtiene que, para mantener la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales, el diámetro del prototipo debería ser aproximadamente 5,7 [m]. Este valor resulta considerablemente mayor que los diámetros de boquillas utilizados en la industria, los cuales típicamente se encuentran en el rango de 20 a 40 [cm].

Del mismo modo, al realizar el mismo procedimiento de la Ecuación (4.4), pero despejando la velocidad y considerando un diámetro de boquilla de 20 [cm], se obtiene una velocidad de 1,9 [m/s] la cual es mucho menor que la velocidad de descarga mostrada en la Tabla 4.9.

Debido a esto se puede concluir que el modelo de difusor no cumple las condiciones para ser escalable, debido a que el prototipo real requeriría de un diámetro de boquilla mucho mayor a los que se utilizan actualmente en la industria. Además de requerir caudales enormes para cumplir con la turbulencia necesaria para que se produzca la dilución. Esto último es un problema importante que considerar ya que velocidades y caudales muy altos de descarga podrían impactar de forma negativa debido a la inercia, los cuales aún son temas de investigación.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

En primer lugar, las alturas que alcanzaron cada pluma de descarga evidenciaron una tendencia a desviarse del valor teórico, especialmente en aquellos experimentos con baja velocidad de salida, debido principalmente a un diámetro de boquilla mayor. Estos resultados indican que las condiciones en la que fueron evaluados no se ajustaban por completo a la fenomenología del proceso, debido a las limitaciones en la instalación experimental, en donde las plumas chocaban directamente con las paredes de la celda. Esta limitación, generaba que las condiciones de no deslizamiento se alcanzarán una vez la pluma impactara la pared, dejando de comportarse como una descarga en el fondo submarino.

Por otro lado, el análisis sobre la dilución axial permitió comparar diferentes perfiles de concentración para diferentes tiempos, alcanzando curvas esperadas que se comportaban de acuerdo con la fenomenología. En este sentido, los experimentos realizados con velocidades altas no alcanzaron la dilución esperada, producto de las limitaciones ya mencionadas. De todas formas, se observó como las plumas se comportaban de acuerdo con la turbulencia esperada, permitiendo validar el desarrollo de los experimentos.

En este mismo contexto, se apreció la influencia del espaciamiento entre portas, ya que los experimentos con un espaciamiento de 4 [cm] experimentaron en una distancia menor desde la boquilla el efecto Coanda, el cual alude a la interacción con chorros adyacentes, que ocasionan fuerzas de presión capaces de desplazar la corriente hacia el límite. Debido a esto, los experimentos con espaciamiento de 8 [cm] obtuvieron mejores resultados en la dilución axial, corroborado por los perfiles.

En cuanto a los parámetros obtenidos para el modelo, se comprobó la significancia tanto del espaciamiento entre las portas, como el diámetro y caudal de operación. En cuanto a las interacciones entre los efectos, solo es significativa la interacción entre el espaciamiento y diámetro, lo que se evidencia en la relación de estos parámetros en el número de Froude. La significancia de estos parámetros puede evidenciarse en los perfiles de dilución axial

presentados, donde el aumento del espaciamiento mostró una mejora sustancial respecto a los casos con menor distancia entre boquillas.

Finalmente, se comprobó que el diseño de los difusores no cumple las condiciones mínimas para su escalabilidad, debido a que no permiten desarrollar el proceso a escala real, necesitando de diámetros y caudales mayores para cumplir con el número de Froude densimétrico.

5.2. Recomendaciones

En relación con las recomendaciones, resulta fundamental contar con una medición precisa de la velocidad a la salida de las boquillas, de modo de asegurar un régimen de flujo plenamente turbulento y el cumplimiento de la condición asociada al número de Froude densimétrico. Asimismo, se sugiere complementar el análisis mediante distintas perspectivas de observación, con el fin de obtener una modelación más completa del fenómeno, a diferencia de lo realizado en el presente trabajo, donde la evaluación se limitó a una vista en planta de la celda experimental.

Por otra parte, un error grave inducido es la interacción de los chorros con los bordes, provocando la rápida saturación del medio y reduciendo los tiempos de muestreo. En este sentido se recomienda una celda con las dimensiones suficientes para minimizar las interacciones con las paredes que provocan la condición de borde de no deslizamiento. Además, la medición de concentración a partir de la Ley de Lambert-Beer limitaba el análisis debido a la utilización de logaritmos para determinar la concentración en un punto. La no-linealidad de la medición limitaba la diferenciación entre regiones concentradas.

Por último, es fundamental llevar a cabo experimentos con diferentes soluciones de salmuera que permitan variar las diferentes configuraciones y analizar las diferentes capas de absorbancia que se puedan generar, manteniendo en todo momento la condición del F_d . Suma a esto, se recomienda el análisis con un trazador fluorescente, como la rodamina, que permitiría modelar con láser y generar vistas de las plumas de forma más precisa.

REFERENCIAS

- Abessi, O., & Roberts, P. J. W. (2014). Multiport Diffusers for Dense Discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 04014032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000882](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000882)
- Abessi, O., & Roberts, P. J. W. (2018). Rosette Diffusers for Dense Effluents in Flowing Currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(1), 06017024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001403](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001403)
- Aguirre, J., Bruna, A., Pérez, J., Winckler, P., & Duarte, C. (2025). *Estimación del área de influencia de una descarga de salmuera proveniente de una planta desaladora mediante modelación física*. <https://www.researchgate.net/publication/397051467>
- Baum, M. J., & Gibbes, B. (2020). Field-Scale Numerical Modeling of a Dense Multiport Diffuser Outfall in Crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(1), 05019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001635](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001635)
- Bleninger, T., & Jirka, G. H. (2008). Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1–3), 585–597. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.059>
- Capó, X., Tejada, S., Ferriol, P., Pinya, S., Mateu-Vicens, G., Montero-González, I., Box, A., & Sureda, A. (2020). Hypersaline water from desalinization plants causes oxidative damage in *Posidonia oceanica* meadows. *Science of The Total Environment*, 736, 139601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139601>

- Chang, J.-S. (2015). Understanding the role of ecological indicator use in assessing the effects of desalination plants. *Desalination*, 365, 416–433. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.013>
- Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). A Review of the Water Desalination Technologies. *Applied Sciences*, 11(2), 670. <https://doi.org/10.3390/app11020670>
- El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). *Fundamentals of salt water desalination* (1st ed). Elsevier.
- Falkenberg, L. J., & Styan, C. A. (2015). The use of simulated whole effluents in toxicity assessments: A review of case studies from reverse osmosis desalination plants. *Desalination*, 368, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.014>
- Heiranian, M., Fan, H., Wang, L., Lu, X., & Elimelech, M. (2023). Mechanisms and models for water transport in reverse osmosis membranes: History, critical assessment, and recent developments. *Chemical Society Reviews*, 52(24), 8455–8480. <https://doi.org/10.1039/D3CS00395G>
- Höpner, T., & Windelberg, J. (1997). Elements of environmental impact studies on coastal desalination plants. *Desalination*, 108(1–3), 11–18. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00003-9)
- Kress, N., Gertner, Y., & Shoham-Frider, E. (2020). Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Research*, 171, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115402>

- Lai, C. C. K., & Lee, J. H. W. (2012). Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), 9–28. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.08.003>
- Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.009>
- Ley 19300 Sobre Bases Generales Del Medio Ambiente, Legislation No. 19300 (2011).
- Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434, 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>
- Orfi, J., Sherif, R., & AlFaleh, M. (2025). Conventional and Emerging Desalination Technologies: Review and Comparative Study from a Sustainability Perspective. *Water*, 17(2), 279. <https://doi.org/10.3390/w17020279>
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment—Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111773. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies—A review. *Science of The Total Environment*, 693, 133545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>
- Pérez-Díaz, B., Palomar, P., Castanedo, S., & Álvarez, A. (2016). Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar. *Ribagua*, 3(2), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.07.003>

- Roberts, P. J. W., Ferrier, A., & Daviero, G. (1997). Mixing in Inclined Dense Jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), 693–699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:8\(693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(693))
- Sola, I., Carratalá, A., Pereira-Rojas, J., Díaz, M. J., Rodríguez-Rojas, F., Sánchez-Lizaso, J. L., & Sáez, C. A. (2024). Assessment of brine discharges dispersion for sustainable management of SWRO plants on the South American Pacific coast. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116905. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116905>
- Voutchkov, N. (2013). *Desalination Engineering: Planning and Design* (First edition). McGraw Hill LLC.
- Ziolkowska, J. R. (2015). Is Desalination Affordable?—Regional Cost and Price Analysis. *Water Resources Management*, 29(5), 1385–1397. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0901-y>

APÉNDICE

Apéndice A. Tabla de viscosidad dinámica

Tabla A.1. Variación en de la viscosidad dinámica en agua de mar ($\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$) como función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad (ppm) (Adaptado de El-Dessouky & Ettouney, 2002)

T ($^{\circ}\text{C}$)	Salinidad ppm						
	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000
10	1,31	1,338	1,365	1,395	1,428	1,463	1,50
15	1,15	1,175	1,199	1,226	1,255	1,286	1,319
20	1,02	1,04	1,062	1,086	1,112	1,14	1,169
25	0,91	0,928	0,948	0,969	0,993	1,018	1,044
30	0,82	0,833	0,851	0,871	0,892	0,915	0,939
35	0,74	0,753	0,77	0,788	0,807	0,827	0,849
40	0,67	0,684	0,7	0,716	0,734	0,753	0,772
45	0,61	0,625	0,639	0,655	0,671	0,688	0,706
50	0,56	0,573	0,587	0,601	0,616	0,632	0,649
55	0,52	0,529	0,541	0,555	0,569	0,584	0,599
60	0,48	0,489	0,501	0,514	0,527	0,541	0,555
65	0,44	0,455	0,466	0,478	0,49	0,503	0,516
70	0,41	0,424	0,435	0,446	0,457	0,469	0,482
75	0,39	0,397	0,407	0,417	0,428	0,439	0,451
80	0,36	0,372	0,382	0,392	0,402	0,413	0,424
85	0,34	0,35	0,359	0,369	0,379	0,389	0,399
90	0,32	0,33	0,339	0,348	0,357	0,367	0,377
95	0,3	0,313	0,321	0,329	0,338	0,347	0,357
100	0,29	0,296	0,304	0,312	0,321	0,33	0,338
105	0,27	0,282	0,289	0,297	0,305	0,313	0,322
110	0,26	0,268	0,275	0,283	0,291	0,298	0,307

Apéndice B. Calibración del Rotámetro

Tabla B.1. Datos de aforo volumétrico para la calibración del rotámetro.

Q [GPM]	Volumen [L]	Tiempo [s]	Q [mL/s]	Q [L/min]
0	0	0	0	0
1	520	10,22	50,88	3,05
1	530	10,35	51,21	3,07
1	500	10,44	47,89	2,87
1	530	10,02	52,89	3,17
2	610	10,09	60,46	3,63
2	600	10,1	59,41	3,56
2	460	10,06	45,73	2,74
2	480	10,02	47,90	2,87
3	740	10,23	72,34	4,34
3	740	10,16	72,83	4,37
3	640	10,2	62,75	3,76
3	660	10,06	65,61	3,94
4	900	10,1	89,11	5,35
4	890	10,2	87,25	5,24
4	900	9,89	91,00	5,46
4	940	10,26	91,62	5,50
5	1100	10,16	108,27	6,50
5	1080	10,16	106,30	6,38
5	1110	10,29	107,87	6,47
5	1100	10,36	106,18	6,37

Apéndice C. Código de Programación en MATLAB

```
clear; clc; close all;

%
=====

% --- 1. CONFIGURACIÓN INICIAL ---

%
=====

videoFile = 'Experimento_5.mp4'; % Cambiar el nombre del video

frames_to_skip = 1; % 1 = todos los frames; 2 = saltea uno, etc.

% ACTIVAR / DESACTIVAR GENERACIÓN DE GIFs

Generar_GIFs = false;

% PARÁMETROS QUÍMICOS

S_descarga = 36; % [g/L] Concentración en boquilla (C0)

S_ambiente = 0; % [g/L] Concentración del ambiente (Ca)

% PARÁMETROS DE ANÁLISIS

T_suavizado_vel = 1.5;

Umbral_Dil_pct = 0.05; % Fracción mínima de C0 para calcular dilución (5 %)

% Evita que zonas con C~0 inflen la curva de dilución

% PARÁMETROS DE DETECCIÓN DE PLUMA

% Umbral absoluto mínimo de absorbancia: evita que ruido de fondo

% sea detectado como pluma cuando aún no hay chorro.

Abs_umbral_min = 0.05; % mínimo absoluto de absorbancia

% Filtra píxeles dispersos de ruido.

Area_minima_cm2 = 1.0; % [cm2]
```

```

if ~isfile(videoFile)
    error('No se encuentra el archivo: %s', videoFile);
end

v = VideoReader(videoFile);

numFrames = v.NumFrames;

fps = v.FrameRate;

fprintf('Video: %s | Frames: %d | FPS: %.1f\n', videoFile, numFrames, fps);

%
=====

% --- 2. CALIBRACIÓN ESPACIAL Y SELECCIÓN DE ZONAS ---

%
=====

frame_ref = read(v, min(100, numFrames));
I_ref = double(frame_ref(:,:,3));
fig_cfg = figure('Name','CONFIGURACIÓN','NumberTitle','off','Position',[50 50 900 700]);
imshow(uint8(I_ref));

% --- Calibración de escala ---

title('PASO 1: CALIBRACIÓN — Dibuja una línea sobre una medida conocida (regla).');
linea_calib = drawline('Color','r','LineWidth',2);

dist_pixeles = norm(linea_calib.Position(2,:) - linea_calib.Position(1,:));

disp('Presiona ENTER en la ventana de comandos para continuar...'); pause;

dist_real_cm = input(';Cuántos CENTÍMETROS reales mide esa línea?: ');

```

```

PX_a_CM    = dist_real_cm / dist_pixeles;

fprintf('Escala: %.4f cm/px\n', PX_a_CM);

% --- Zona nozzle izquierdo (PRIMERO: es el punto de referencia para dibujar el ROI) ---

title('PASO 2: ZONA NOZZLE IZQUIERDO — Dibuja una caja pequeña sobre la boquilla
izq. (donde el colorante sale más intenso).');

roi_noz_L    = drawrectangle('Color','y');

roi_noz_L_rect = round(roi_noz_L.Position);

% --- Zona nozzle derecho ---

title('PASO 3: ZONA NOZZLE DERECHO — Dibuja una caja pequeña sobre la boquilla
der. (donde el colorante sale más intenso).');

roi_noz_R    = drawrectangle('Color','m');

roi_noz_R_rect = round(roi_noz_R.Position);

% --- Zona chorro izquierdo ---

title('PASO 4: CHORRO IZQUIERDO — Dibuja ROI abarcando toda la pluma hacia la
izquierda (incluye la boquilla).');

roi_L    = drawrectangle('Color','g');

roi_L_rect = round(roi_L.Position); % [x y w h]

% --- Zona chorro derecho ---

title('PASO 5: CHORRO DERECHO — Dibuja ROI abarcando toda la pluma hacia la
derecha (incluye la boquilla).');

roi_R    = drawrectangle('Color','b');

roi_R_rect = round(roi_R.Position);

pause; close(fig_cfg);

```

```

%
=====

% --- 3. IMAGEN BASE (I0): promedio de primeros 10 frames (sin colorante) ---
%
=====

fprintf('Calculando imagen base I0...\n');
n_base = min(10, numFrames);
I0_acum = zeros(v.Height, v.Width, 'double');
for k = 1:n_base
    I0_acum = I0_acum + double(read(v, k));
end
I0_full = I0_acum / n_base;
I0_L = imcrop(I0_full(:,:,3), roi_L_rect);
I0_R = imcrop(I0_full(:,:,3), roi_R_rect);
I0_noz_L = imcrop(I0_full(:,:,3), roi_noz_L_rect);
I0_noz_R = imcrop(I0_full(:,:,3), roi_noz_R_rect);
% Fondo del índice rojo R-(G+B)/2 para resta de fondo en GIFs
I0_red_L = imcrop(I0_full(:,:,1), roi_L_rect) - ...
    (imcrop(I0_full(:,:,2), roi_L_rect) + imcrop(I0_full(:,:,3), roi_L_rect)) / 2;
I0_red_R = imcrop(I0_full(:,:,1), roi_R_rect) - ...
    (imcrop(I0_full(:,:,2), roi_R_rect) + imcrop(I0_full(:,:,3), roi_R_rect)) / 2;
%
=====

% --- 4. SEGUIMIENTO TRANSITORIO (ÁREA + FRENTE HORIZONTAL) ---

```

```

%
=====

fprintf('Rastreando plumas frame a frame...\n');

idx_vec = 1:frames_to_skip:numFrames;

t_vec = (idx_vec - 1) / fps;

N = length(idx_vec);

Area_L = zeros(N,1); Area_R = zeros(N,1);

Frente_L = zeros(N,1); Frente_R = zeros(N,1);

sig_L = zeros(N,1); sig_R = zeros(N,1);

h_wb = waitbar(0,'Rastreando plumas...');

for i = 1:N

    frame = read(v, idx_vec(i));

    I_curr_L = double(imcrop(frame(:,:,3), roi_L_rect));

    I_curr_R = double(imcrop(frame(:,:,3), roi_R_rect));

    eps_val = 1e-6;

    % Intensidad en boquilla (señal de estabilidad)

    sig_L(i) = mean(I_curr_L(:, end-min(5,size(I_curr_L,2)-1):end), 'all');

    sig_R(i) = mean(I_curr_R(:, 1:min(5,size(I_curr_R,2)-1)), 'all');

    % Absorbancia con filtro de mediana + normalización local por fondo

    I0_L_m = mean(I0_L(:)) + eps_val;

    I0_R_m = mean(I0_R(:)) + eps_val;

    Abs_L = medfilt2(log((I0_L/I0_L_m + eps_val)./(I_curr_L/I0_L_m + eps_val)),[5 5]);

    Abs_L(Abs_L < 0) = 0;

    Abs_R = medfilt2(log((I0_R/I0_R_m + eps_val)./(I_curr_R/I0_R_m + eps_val)),[5 5]);

```

```

Abs_R(Abs_R < 0) = 0;

% Umbral robusto: usa percentil 99 pero respeta mínimo absoluto
% para que ruido de fondo (~0.01-0.02) nunca active la detección
umb_L = max(0.05 * prctile(Abs_L(:), 99), Abs_umbral_min);
umb_R = max(0.05 * prctile(Abs_R(:), 99), Abs_umbral_min);
mask_L = Abs_L > umb_L;
mask_R = Abs_R > umb_R;

% Área [cm²] — se reporta 0 si no supera el área mínima (ruido disperso)
area_L_raw = sum(mask_L(:)) * (PX_a_CM^2);
area_R_raw = sum(mask_R(:)) * (PX_a_CM^2);
Area_L(i) = area_L_raw * (area_L_raw >= Area_minima_cm2);
Area_R(i) = area_R_raw * (area_R_raw >= Area_minima_cm2);

% Frente horizontal [cm desde boquilla]

% Solo se registra si el área supera el mínimo (hay pluma real)
if Area_L(i) > 0
    cols_L = any(mask_L, 1);
    if any(cols_L)
        Frente_L(i) = (size(mask_L,2) - find(cols_L,1,'first')) * PX_a_CM;
    end
end

if Area_R(i) > 0
    cols_R = any(mask_R, 1);
    if any(cols_R)
        Frente_R(i) = find(cols_R,1,'last') * PX_a_CM;
    end
end

```

```

        end

    end

    if mod(i,50)==0, waitbar(i/N, h_wb); end

end

close(h_wb);

% --- Velocidad de avance (ventana de suavizado expresada en segundos) ---
win_frames = max(3, round(T_suavizado_vel * fps / frames_to_skip));

if mod(win_frames,2)==0, win_frames = win_frames+1; end % ventana impar

Vel_L = gradient(smoothdata(Frente_L,'gaussian',win_frames)) ./ gradient(t_vec');
Vel_R = gradient(smoothdata(Frente_R,'gaussian',win_frames)) ./ gradient(t_vec');

%
=====

% --- 5. DASHBOARD TRANSITORIO ---

%
=====

fig_dash = figure('Name','Dashboard Advección Dual','Position',[50 50 1100
420],'Color','w');

subplot(1,2,1);

plot(t_vec, Area_L,'g','LineWidth',2); hold on;

plot(t_vec, Area_R,'b','LineWidth',2);

grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Área [cm²]');

title('Área de la mancha en el tiempo');

legend('Izquierdo','Derecho','Location','best');

```

```

subplot(1,2,2);
plot(t_vec, sig_L,'g','LineWidth',1.5); hold on;
plot(t_vec, sig_R,'b','LineWidth',1.5);
grid on; xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Intensidad promedio (canal azul)');
title('Señal en boquilla');
subtitle('Caída de intensidad indica llegada del colorante');
legend('Izquierdo','Derecho','Location','best');
exportgraphics(fig_dash, ['Dashboard_Transitorio_' videoFile(1:end-4) '.png'],
'Resolution',200);
fprintf('Dashboard transitorio guardado.\n');
% --- Selección de ventana estacionaria ---
disp('Observa el Dashboard. ');
disp('Dado que la pluma nunca se estabiliza completamente,');
disp('define la ventana desde ANTES de que salga el chorro hasta ANTES del choque con la
pared. ');
tau_d_sec = input('Tiempo de INICIO de ventana [s] (puede ser antes de que salga el
chorro): ');
tau_end_sec = input('Tiempo de FIN de ventana [s] (antes del choque con pared o fondo): ');
tau_d = max(1, round(tau_d_sec * fps));
tau_end = min(numFrames, round(tau_end_sec * fps));
%
=====

% --- 6. PROCESAMIENTO ESTACIONARIO ---
% Solo se promedian los frames donde la pluma está presente en AMBOS
% chorros (área > Area_minima_cm2). Esto excluye automáticamente los

```

```

% frames iniciales vacíos, resolviendo el sesgo por inicio tardío.
%
=====

fprintf('Calculando mapas de estado estable (frames %d a %d)...\\n', tau_d, tau_end);
fprintf('Solo se incluirán frames con pluma activa (área > %.1f cm²).\\n', Area_minima_cm2);
frames_analisis = max(1, tau_d):frames_to_skip:tau_end;
Acum_L = zeros(size(I0_L));
Acum_R = zeros(size(I0_R));
Acum_nozL = zeros(size(I0_noz_L));
Acum_nozR = zeros(size(I0_noz_R));
count = 0;
count_skip = 0; % frames descartados por ausencia de pluma
h_wb = waitbar(0,'Promediando frames con pluma activa...');
for k = 1:length(frames_analisis)
    try
        frame = read(v, frames_analisis(k));
    catch
        continue;
    end
    I_ch = double(frame(:,:,3));
    % Verificar que haya pluma en ambos chorros antes de incluir el frame
    I_curr_L_k = imcrop(I_ch, roi_L_rect);
    I_curr_R_k = imcrop(I_ch, roi_R_rect);

```

```

Abs_k_L = medfilt2(log((I0_L + eps_val)./(I_curr_L_k + eps_val)),[5 5]);
Abs_k_R = medfilt2(log((I0_R + eps_val)./(I_curr_R_k + eps_val)),[5 5]);
Abs_k_L(Abs_k_L<0)=0; Abs_k_R(Abs_k_R<0)=0;
area_k_L = sum(Abs_k_L(:) > Abs_umbral_min) * PX_a_CM^2;
area_k_R = sum(Abs_k_R(:) > Abs_umbral_min) * PX_a_CM^2;

% Solo acumular si AMBOS chorros tienen pluma activa
if area_k_L >= Area_minima_cm2 && area_k_R >= Area_minima_cm2

    Acum_L = Acum_L + I_curr_L_k;
    Acum_R = Acum_R + I_curr_R_k;
    Acum_nozL = Acum_nozL + imcrop(I_ch, roi_noz_L_rect);
    Acum_nozR = Acum_nozR + imcrop(I_ch, roi_noz_R_rect);
    count = count + 1;

else

    count_skip = count_skip + 1;

end

waitbar(k/length(frames_analisis), h_wb);

end

close(h_wb);

fprintf('Frames incluidos en promedio : %d\n', count);
fprintf('Frames descartados (sin pluma): %d\n', count_skip);

if count == 0

    error('Ningún frame tuvo pluma activa en ambos chorros. Revisa tau_d, tau_end o
Abs_umbral_min.');
```

```

IM_L = Acum_L / count;
IM_R = Acum_R / count;
IM_nozL = Acum_nozL / count;
IM_nozR = Acum_nozR / count;

%
=====

% --- 7. CONVERSIÓN ABSORBANCIA → CONCENTRACIÓN (normalización por
nozzle) ---

%
=====

eps_val = 1e-6;

% Normalización local por fondo: divide cada ROI por su media de I0
% → elimina diferencias de iluminación entre lados izquierdo y derecho

I0_L_norm = I0_L / (mean(I0_L(:)) + eps_val);
I0_R_norm = I0_R / (mean(I0_R(:)) + eps_val);
IM_L_norm = IM_L / (mean(I0_L(:)) + eps_val);
IM_R_norm = IM_R / (mean(I0_R(:)) + eps_val);
I0_noz_L_norm = I0_noz_L / (mean(I0_noz_L(:)) + eps_val);
I0_noz_R_norm = I0_noz_R / (mean(I0_noz_R(:)) + eps_val);
IM_nozL_norm = IM_nozL / (mean(I0_noz_L(:)) + eps_val);
IM_nozR_norm = IM_nozR / (mean(I0_noz_R(:)) + eps_val);

% Absorbancia en toda la ROI (sobre imágenes normalizadas)

Abs_L = log((I0_L_norm + eps_val)./(IM_L_norm + eps_val)); Abs_L(Abs_L<0)=0;
Abs_R = log((I0_R_norm + eps_val)./(IM_R_norm + eps_val)); Abs_R(Abs_R<0)=0;

```

```

% Absorbancia de referencia en la zona nozzle

Abs_nozL = log((I0_noz_L_norm + eps_val)/(IM_nozL_norm + eps_val));
Abs_nozR = log((I0_noz_R_norm + eps_val)/(IM_nozR_norm + eps_val));
Abs_nozL(Abs_nozL<0)=0; Abs_nozR(Abs_nozR<0)=0;

Abs_ref_L = prctile(Abs_nozL(:), 90);
Abs_ref_R = prctile(Abs_nozR(:), 90);

% --- DIAGNÓSTICO: valores de referencia ---
fprintf('\n--- DIAGNÓSTICO DE NORMALIZACIÓN ---\n');
fprintf('Abs_ref Izquierdo : %.4f\n', Abs_ref_L);
fprintf('Abs_ref Derecho  : %.4f\n', Abs_ref_R);
fprintf(' (valor esperado: 0.10 – 1.50)\n');
fprintf(' Si es muy bajo, reintentando dibujando la zona nozzle\n');
fprintf(' más cerca de la boquilla o en un frame con chorro activo.\n');

% Ambas boquillas descargan la misma C0, por lo tanto Abs_ref debe ser
% el mismo para ambos lados. Se usa el máximo entre ambos como referencia
% compartida, que corresponde al lado mejor calibrado.
% Esto corrige diferencias de iluminación no uniforme entre lados.
Abs_ref_shared = max(Abs_ref_L, Abs_ref_R);

% Fallback: si el máximo también es bajo, usar percentil 95 del ROI más absorbente
if Abs_ref_shared < 0.05

```

```

Abs_ref_shared = max(prctile(Abs_L(:), 95), prctile(Abs_R(:), 95));

warning('Abs_ref muy bajo en ambos lados → usando percentil 95 global: %.4f',
Abs_ref_shared);

end

Abs_ref_L = Abs_ref_shared;

Abs_ref_R = Abs_ref_shared;

fprintf('Abs_ref compartido : %.4f (usado para ambos chorros)\n', Abs_ref_shared);

fprintf('-----\n\n');

% Concentración normalizada C/C0 ∈ [0, 1]

% No requiere curva de calibración: 0 = ambiente, 1 = boquilla

Sal_L = Abs_L / Abs_ref_L;

Sal_R = Abs_R / Abs_ref_R;

Sal_L = min(max(Sal_L, 0), 1);

Sal_R = min(max(Sal_R, 0), 1);

%

=====

% --- 8. DILUCIÓN AXIAL HORIZONTAL ---

%

% CORRECCIÓN: Se calcula D = C0/C solo donde C > Umbral_Dil_pct * C0.

% Esto elimina la inflación artificial de la dilución en zonas con C≈0

% (donde el +0.1 anterior producía valores espurios).

%

=====

Perfil_C_L = max(Sal_L, [], 1); % Máxima concentración por columna

Perfil_C_R = max(Sal_R, [], 1);

```

```

% El chorro izquierdo va de derecha a izquierda en la imagen → invertir
Perfil_C_L = fliplr(Perfil_C_L);
Dist_L_cm = (1:length(Perfil_C_L)) * PX_a_CM;
Dist_R_cm = (1:length(Perfil_C_R)) * PX_a_CM;
C_min_valido = Umbral_Dil_pct; % mínimo de C/C0 para calcular dilución (ej. 0.05 = 5%)
% Máscara de zonas válidas
valid_L = Perfil_C_L > C_min_valido;
valid_R = Perfil_C_R > C_min_valido;
% Dilución  $D = C_0/C = 1/(C/C_0)$ , solo en zonas válidas
Dilucion_L = nan(size(Perfil_C_L));
Dilucion_R = nan(size(Perfil_C_R));
Dilucion_L(valid_L) = 1 ./ Perfil_C_L(valid_L);
Dilucion_R(valid_R) = 1 ./ Perfil_C_R(valid_R);
%
=====

% --- 9. VISUALIZACIÓN FINAL ---
%
=====

fig_res = figure('Name','Resultados Dilución Estacionaria','Position',[100 100 1100
650],'Color','w');
subplot(2,2,1);
xL_max = size(Sal_L,2)*PX_a_CM;
yL_max = size(Sal_L,1)*PX_a_CM;
% X invertido: 0 en boquilla (borde derecho del ROI), crece hacia la izquierda
% Y normal: 0 en la parte inferior

```

```

imagesc([xL_max, 0], [yL_max, 0], Sal_L); axis image; colormap('turbo'); colorbar;
clim([0, 1]);
set(gca, 'YDir','normal');
title('Concentración normalizada (C/C_0) — Izquierdo');
xlabel('Distancia desde boquilla [cm]'); ylabel('cm');

subplot(2,2,2);
xR_max = size(Sal_R,2)*PX_a_CM;
yR_max = size(Sal_R,1)*PX_a_CM;
imagesc([0, xR_max], [yR_max, 0], Sal_R); axis image; colormap('turbo'); colorbar;
clim([0, 1]);
set(gca, 'YDir','normal');
title('Concentración normalizada (C/C_0) — Derecho');
xlabel('Distancia desde boquilla [cm]'); ylabel('cm');

% Omitir primeros 3 píxeles del chorro izquierdo (artefacto de borde de ROI)
skip_px = 3;
valid_L(1:skip_px) = false;

subplot(2,2,[3 4]);
plot(Dist_L_cm(valid_L), Dilucion_L(valid_L),'g-','LineWidth',2); hold on;
plot(Dist_R_cm(valid_R), Dilucion_R(valid_R),'b-','LineWidth',2);
xline(Dist_L_cm(find(valid_L,1,'last')),'g--','Alpha',0.4,'Label','Fin zona válida izq');
xline(Dist_R_cm(find(valid_R,1,'last')),'b--','Alpha',0.4,'Label','Fin zona válida der');

```

```

grid on;

xlabel('Distancia axial desde boquilla [cm]'); ylabel('Dilución  $D = C_0/C$  [—]');
title(sprintf('Dilución Axial (solo donde  $C/C_0 > %.0f\%$ )', Umbral_Dil_pct*100));
subtitle('D = 1 en boquilla ( $C = C_0$ ), aumenta con la distancia al diluirse el chorro');
legend('Chorro Izquierdo','Chorro Derecho','Location','northwest');

exportgraphics(fig_res, ['Resultados_Dilucion_' videoFile(1:end-4) '.png'],
'Resolution',200);

%
=====

% --- 10. GIF COLORMAP POR CHORRO ---

% MÁSCARA: índice rojo  $R-(G+B)/2$  con resta de fondo estático.
% Esto elimina sombras, manchas en el vidrio y variaciones de
% iluminación, aislando solo el colorante rojo de la pluma.
% CONCENTRACIÓN: Beer-Lambert (canal azul) para el colormap.
% Para activar: cambia Generar_GIFs = true al inicio del código.

%
=====

if Generar_GIFs
fprintf('\nGenerando GIFs colormap...\n');

cmap_gif = turbo(256);

n_cmap = 256;

```

```

% Frames del intervalo estacionario

idx_gif = max(1, tau_d):frames_to_skip:tau_end;
t_gif   = (idx_gif - 1) / fps;

fps_gif = min(fps, 15);
step_gif = max(1, round(fps / fps_gif));
idx_gif = idx_gif(1:step_gif:end);
t_gif   = t_gif(1:step_gif:end);
N_gif   = length(idx_gif);
delay_gif = 1 / fps_gif;

% Umbral del índice rojo (ajustar si la máscara captura ruido o pierde pluma)
Umbral_rojo = 0.03;

vnames = {'Izquierdo','Derecho'};

for lado = 1:2
    if lado==1
        roi_r   = roi_L_rect; I0_ch = I0_L;
        Abs_ref = Abs_ref_L; lbl   = 'Izq';
        I0_red  = I0_red_L;
    else
        roi_r   = roi_R_rect; I0_ch = I0_R;
        Abs_ref = Abs_ref_R; lbl   = 'Der';
    end
end

```

```

I0_red = I0_red_R;

end

gifName = sprintf('GIF_%s_colormap_%s.gif', lbl, videoFile(1:end-4));

fig_gif = figure('Name', sprintf('Chorro %s — Colormap | %s', vnames{lado}, videoFile),
...
                'Color','w', 'NumberTitle','off');

ax_gif = axes('Parent', fig_gif, 'Position',[0.05 0.05 0.85 0.90]);

h_wb2 = waitbar(0, sprintf('Generando GIF colormap %s...', vnames{lado}));

for i = 1:N_gif

    frame = read(v, idx_gif(i));

    % --- MÁSCARA: índice rojo con resta de fondo ---
    R_f = im2double(imcrop(frame(:,:,1), roi_r));
    G_f = im2double(imcrop(frame(:,:,2), roi_r));
    B_f = im2double(imcrop(frame(:,:,3), roi_r));
    I_rojo = R_f - (G_f + B_f) / 2; % índice rojo del frame actual
    pluma = I_rojo - I0_red; % resta de fondo estático
    pluma(pluma < 0) = 0;
    pluma = imgaussfilt(pluma, 3); % suavizado para bordes limpios

    % Máscara limpia

```

```

min_px = round(Area_minima_cm2 / PX_a_CM^2);
mask_i = pluma > Umbral_rojo;
mask_i = bwareaopen(mask_i, max(1, min_px));
mask_i = imclose(mask_i, strel('disk', 5));
mask_i = imfill(mask_i, 'holes'); % rellenar huecos internos
fondo = ~mask_i;

% Concentración normalizada C/C0 para el colormap (Beer-Lambert canal azul)
% con normalización local por fondo para compensar iluminación no uniforme
I_curr = double(imcrop(frame(:,:,3), roi_r));
I0_ch_m = mean(I0_ch(:)) + eps_val;
Abs_i = medfilt2(log((I0_ch/I0_ch_m + eps_val) ./ (I_curr/I0_ch_m + eps_val)), [5
5]);
Abs_i(Abs_i < 0) = 0;
Abs_i = imgaussfilt(Abs_i, 3);
Sal_i = min(max(Abs_i / Abs_ref, 0), 1);

% Colormap turbo completo aplicado a C/C0 en todo el ROI
% (zonas de baja concentración aparecen en azul, no en blanco)
Sal_norm = Sal_i;
idx_c = max(1, min(n_cmap, round(Sal_norm*(n_cmap-1))+1));
R = uint8(reshape(cmap_gif(idx_c,1)*255, size(Sal_i)));
G = uint8(reshape(cmap_gif(idx_c,2)*255, size(Sal_i)));
B = uint8(reshape(cmap_gif(idx_c,3)*255, size(Sal_i)));

```

```

frame_rgb = cat(3, R, G, B);

% Mostrar en ventana MATLAB

imshow(frame_rgb, 'Parent', ax_gif);

title(ax_gif, sprintf('Chorro %s | t = %.2f s', vnames{lado}, t_gif(i)), 'FontSize',12);

drawnow;

% Escribir frame al GIF

[img_ind, map_ind] = rgb2ind(frame_rgb, 256);

if i == 1

    imwrite(img_ind, map_ind, gifName, 'gif', 'LoopCount',Inf, 'DelayTime',delay_gif);

else

    imwrite(img_ind, map_ind, gifName, 'gif', 'WriteMode','append',
'DelayTime',delay_gif);

end

if mod(i,20)==0, waitbar(i/N_gif, h_wb2); end

end

close(h_wb2);

fprintf('GIF guardado: %s (%d frames, %.1f fps)\n', gifName, N_gif, fps_gif);

end % for lado

else

fprintf('\nGIFs omitidos (Generar_GIFs = false).\n');

```

```
end % if Generar_GIFs
```

```
%
```

```
=====
```

```
% --- 11. EXPORTACIÓN DoE ---
```

```
%
```

```
=====
```

```
% Dilución final% Dilución final: promedio del último 20% válido de cada chorro
```

```
idx_val_L = find(valid_L);
```

```
idx_val_R = find(valid_R);
```

```
if ~isempty(idx_val_L)
```

```
    rng_L = idx_val_L(round(0.8*end):end);
```

```
    Dil_Final_L = mean(Dilucion_L(rng_L), 'omitnan');
```

```
else
```

```
    Dil_Final_L = NaN;
```

```
    warning('No hay zona válida para dilución izquierda.');
```

```
end
```

```
if ~isempty(idx_val_R)
```

```
    rng_R = idx_val_R(round(0.8*end):end);
```

```
    Dil_Final_R = mean(Dilucion_R(rng_R), 'omitnan');
```

```

else
    Dil_Final_R = NaN;
    warning('No hay zona válida para dilución derecha.');
```

end

```

Dil_Promedio = mean([Dil_Final_L, Dil_Final_R], 'omitnan');
```

% --- Exportar perfil axial de dilución en función de la distancia ---

```

xlsxPerfil = ['Perfil_Dilucion_' videoFile(1:end-4) '.xlsx'];
```

```

T_perfil_L = table( ...
    Dist_L_cm(valid_L)', ...
    Perfil_C_L(valid_L)', ...
    Dilucion_L(valid_L)', ...
    'VariableNames', {'Distancia_cm', 'C_sobre_C0', 'Dilucion_D'});
writetable(T_perfil_L, xlsxPerfil, 'Sheet', 'Chorro_Izquierdo');
```

```

T_perfil_R = table( ...
    Dist_R_cm(valid_R)', ...
    Perfil_C_R(valid_R)', ...
    Dilucion_R(valid_R)', ...
    'VariableNames', {'Distancia_cm', 'C_sobre_C0', 'Dilucion_D'});
writetable(T_perfil_R, xlsxPerfil, 'Sheet', 'Chorro_Derecho');
```

```
fprintf('\n===== RESULTADO DoE =====\n');  
fprintf('Archivo : %s\n', videoFile);  
fprintf('Dilución Izquierda : %.3f\n', Dil_Final_L);  
fprintf('Dilución Derecha : %.3f\n', Dil_Final_R);  
fprintf('DILUCIÓN PROMEDIO Y : %.3f <-- usar en tabla DoE\n', Dil_Promedio);  
fprintf('Perfil axial exportado a: %s\n', xlsxPerfil);  
fprintf('===== \n');
```